

基于航向参照匹配的航迹抗差关联算法

董凯, 王海鹏, 刘瑜, 何友

(海军航空工程学院信息融合技术研究所, 山东烟台 264001)

摘要: 探讨了系统误差影响下的多传感器航迹关联问题。由于传感器观测存在虚警和漏报, 利用目标拓扑信息进行航迹关联的算法可靠性会降低。提出一种基于航向参照匹配的航迹抗差关联算法, 该算法首先建立以传感器观测目标为原点、航向为参照的运动坐标系, 对邻居目标数据进行旋转和平移转换; 然后对各目标参照系下的邻居目标以目标距离为统计量进行全局最优关联; 最后以各目标参照系下确认关联对的平均距离为匹配度量, 以使匹配度量最小的参照目标对为关联匹配目标。仿真结果从目标共同观测率、系统误差范围和目标密集程度等方面验证了算法的有效性和健壮性。

关键词: 航迹关联; 系统误差; 虚警; 漏报; 抗差关联; 航向参照

中图分类号: TN957 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)11-0041-05

On Anti-Bias Track Association Algorithm Based on Course Reference Matching

DONG Kai, WANG Hai-peng, LIU Yu, HE You

(Research Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: The multi-sensor track association under the influence of systematic bias is discussed. The algorithms that utilize target topology information are not reliable for track association due to the false alarm and missing detection in sensor observation. Thus we proposed an anti-bias track association algorithm based on target course reference. Firstly, a moving coordinate system was established taking the position of the observed target as the origin and its course as reference direction, and then rotation/translation transformation was made to the neighboring targets' data. Secondly, the distance of neighboring targets in different target reference coordinate system was used as the statistics for global optimal track association. The average distance of confirmed associated pairs in all target reference coordinate systems was taken as the matching metric, and the corresponding reference target pair reaching the minimum matching measurement was regarded as matched targets. The simulation results prove the effectiveness and robustness of the algorithm from several aspects including the target common observation ratio, systematic bias range and target density.

Key words: track association; systematic bias; false alarm; missing detection; anti-bias association; course reference

0 引言

分布式多传感器航迹融合的前提是航迹关联, 其含义是判断不同传感器的两条航迹是否代表同一个

目标的过程^[1]。在工程应用中, 由于传感器往往存在一定的距离、方位角、俯仰角测量的系统误差, 使得传感器的观测航迹整体偏离目标真实轨迹。由于传统的航迹关联算法^[2-5]根据各传感器航迹间的距离信息进行关联判断, 没有考虑传感器普遍存在的系统误差, 因而实际应用效果并不理想。

针对系统误差影响下的航迹关联问题(本文称之为航迹抗差关联问题), 人们从利用观测目标之间拓扑信息的角度进行了一些有益的研究^[6-10], 并取得了一

收稿日期: 2013-11-25

修回日期: 2013-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(61032001); 山东省自然科学基金(ZR2012 FQ004)

作者简介: 董凯(1986—), 男, 湖南岳阳人, 博士生, 研究方向为雷达数据处理、多源信息融合等。

定效果,但是这些方法大多隐含假设各传感器观测相同数目的目标,从而保证目标拓扑结构的相似性,实现正确关联。然而在实际环境中,传感器观测往往存在虚警和漏报,使不同传感器观测目标的拓扑结构相似性显著降低,影响关联的可靠性。文献[11]考虑目标状态存在丢失的情况,提出一种区域匹配的航迹关联算法(区域匹配法),它根据目标点对的欧式距离建立匹配支持度,采用松弛迭代的方法逐步选取平均匹配支持度最大的目标对作为匹配目标点对,但是由于该方法将系统误差对传感器观测航迹的影响近似为平移效应,因此只有在目标分布区域和系统误差都较小的情况下,才能保证较高的正确关联率。所以,为使算法能够适应传感器存在虚警和漏报、系统误差较大、目标分布区域较广的复杂环境,本文在区域匹配法的基础上,提出一种基于航向参照匹配的航迹抗差关联算法。首先,理论分析系统误差对传感器观测的影响,将其合理近似为平移和旋转效应;然后以观测目标航向为参照,对不同传感器的目标拓扑结构分别进行平移和旋转变换,以关联目标平均欧式距离为匹配度量,搜索最佳匹配航迹关联对;最后仿真验证了算法的有效性。

1 问题描述

1.1 系统误差对传感器观测的影响

以二维情况为例,假设两部传感器对目标进行跟踪观测,两传感器的航迹集合分别为

$$U_1 = \{1, 2, \dots, n_1\}, U_2 = \{1, 2, \dots, n_2\} \quad (1)$$

式中, n_1 和 n_2 分别为两传感器的观测航迹数。定义两传感器 k 时刻的航迹数据在公共直角坐标系中第 i 和第 j 条航迹的状态估计分别为 $\hat{X}_1^i(k)$ 和 $\hat{X}_2^j(k)$ (为简便起见,略去时间下标 k)。

$$\begin{cases} \hat{X}_1^i = [\hat{x}_1^i & \hat{x}_1^i & \hat{y}_1^i & \hat{y}_1^i]' & i \in U_1 \\ \hat{X}_2^j = [\hat{x}_2^j & \hat{x}_2^j & \hat{y}_2^j & \hat{y}_2^j]' & j \in U_2 \end{cases} \quad (2)$$

通常认为,传感器系统误差为较小常量或者长时间范围内的缓变量,因此在较短观测时间内可以视为常量。设真实目标的距离和方位分别为 r 和 θ , 不考虑随机量测误差时,传感器方位和距离系统误差分别使目标观测值偏离 $\Delta\theta$ 角度和 Δr 距离,即在系统误差影响下,所有目标的观测值在传感器极坐标系下相对目标真实位置发生 $\Delta\theta$ 的旋转和 Δr 的伸缩。文献[10]的推导表明,当目标观测区域距离传感器较远时 ($\Delta r/r \ll 1$), 可忽略距离系统误差引起的仿射变换,近似认为传感器的系统误差不改变各目标之间的相对位置关系,即一部传感器的航迹经过整体旋转和平移后能够与另一部传感器的航迹重合,这在实际上通常容易满足 ($r \geq 50 \text{ km}, \Delta r \leq 1 \text{ km}$)。

1.2 目标参照系的建立

由于传感器存在正北方位系统误差,不同传感器局部直角坐标系的坐标轴方向不一致,因此,在不同传感器的局部直角坐标系下对目标拓扑关系进行描述仍然隐含方位系统误差。然而,传感器滤波得到的目标航向也包含方位系统误差,如果以目标位置为原点、目标航向为参照建立目标参照系,对邻居目标数据进行旋转和平移转换,可以抵消系统误差的影响。以传感器 1 的观测为例,如图 1、图 2 所示。

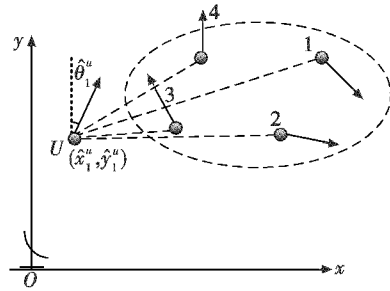


图 1 传感器 1 观测目标分布示意图

Fig. 1 Target distribution from observation of sensor 1

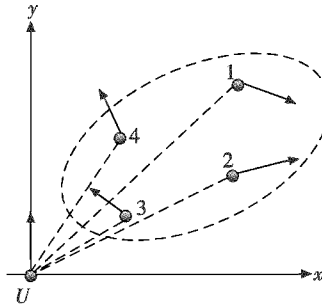


图 2 基于航向参照的邻居目标分布示意图

Fig. 2 Neighboring target distribution based on target course reference

图 1 为传感器 1 观测 5 个目标的分布示意图,图中,箭头方向表示目标航向, U 表示传感器 1 观测目标 u 位置, $\hat{\theta}_1^u$ 表示其相对正北的航向。通过旋转和平移可得 U 为坐标原点、目标 u 航向为 y 轴正向的目标参照系,如图 2 所示。对比图 1 和图 2 可见,图 2 中各邻居目标的位置相对图 1 整体平移 $(\hat{x}_1^u, \hat{y}_1^u)$ 并逆时针旋转 $\hat{\theta}_1^u$, 速度方向同样逆时针旋转 $\hat{\theta}_1^u$ 。同理,可建立以传感器 2 的观测目标 v 位置为原点、航向为 y 轴正向的目标参照坐标系。如上所述,在距离系统误差远远小于目标与传感器距离条件下,当目标 u 、目标 v 为同一目标时,其邻居目标分布接近一致,仅受随机误差的影响。

1.3 邻居目标数据转换

同样以传感器 1 的观测目标为例,将邻居目标位置数据转换至目标 u ($u \in U_1$) 的参照系下。提取状态估计中的位置信息

$$\begin{cases} \mathbf{A}_1^i = [\hat{x}_1^i & \hat{y}_1^i]' \\ \mathbf{A}_1^u = [\hat{x}_1^u & \hat{y}_1^u]' \end{cases} \quad (3)$$

通过平移和旋转转换,得到目标坐标估计值为

$$\mathbf{B}_1^i(u) = \mathbf{T}_1(u) [\mathbf{A}_1^i - \mathbf{A}_1^u] \quad (4)$$

式中, $\mathbf{T}_1(u)$ 为旋转矩阵,与目标 u 的航向 θ_1^u 有关:

$$\mathbf{T}_1(u) = \begin{bmatrix} \cos \theta_1^u & \sin \theta_1^u \\ -\sin \theta_1^u & \cos \theta_1^u \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\theta_1^u = \arctan(\hat{x}_1^u / \hat{y}_1^u) \quad (6)$$

同理,将传感器 2 的观测目标转换至目标 $v (v \in U_2)$ 参照系下,得到目标坐标估计值 $\mathbf{B}_2^j(v)$ 。显然,目标 u 和目标 v 是两个参照系的原点,即

$$\mathbf{B}_1^u(u) = \mathbf{B}_2^v(v) = [0, 0]' \quad (7)$$

2 目标航向参照匹配模型

当传感器 1 的目标 u 和传感器 2 的目标 v 为匹配目标时,可在统一的目标参照系下分别计算目标 u 和目标 v 的邻居目标之间的距离,即传感器 1 的目标 i 和传感器 2 的目标 j 之间的欧式距离为

$$\gamma_{ij}(u, v) = \|\mathbf{B}_1^i(u) - \mathbf{B}_2^j(v)\|_2 = \|\mathbf{T}_1(u) [\mathbf{A}_1^i - \mathbf{A}_1^u] - \mathbf{T}_2(v) [\mathbf{A}_2^j - \mathbf{A}_2^v]\|_2 \quad (8)$$

建立以 $\gamma_{ij}(u, v)$ 为统计量, L 为目标函数的二维分配模型^[12-13],求解全局最优的航迹关联关系为

$$L = \min_{\eta_{ij}} \sum_{i=1, i \neq u}^{n_1} \sum_{j=1, j \neq v}^{n_2} \eta_{ij} \gamma_{ij}(u, v) \quad (9)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1, j \neq v}^{n_2} \eta_{ij} = 1, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n_1, \quad i \neq u \quad (10)$$

$$\sum_{i=1, i \neq u}^{n_1} \eta_{ij} = 1, \quad \forall j = 1, 2, \dots, n_2, \quad j \neq v \quad (11)$$

式中, η_{ij} 为二进制变量, $\eta_{ij} = 1$ 表示航迹 i 和航迹 j 来自于同一目标, $\eta_{ij} = 0$ 则表示来自于不同目标。二维分配处理得到的关联对再经过距离门限 ε 和速度门限 ζ 的检验,通过检验才被确认为航迹关联对,即

$$\begin{cases} \gamma_{ij}(u, v) \leq \varepsilon \\ \left| \sqrt{(\hat{x}_1^i)^2 + (\hat{y}_1^i)^2} - \sqrt{(\hat{x}_2^j)^2 + (\hat{y}_2^j)^2} \right| \leq \zeta \end{cases} \quad (12)$$

由于传感器虚警和漏检导致可能存在非共同观测目标,邻居目标的拓扑结构不一定一致,不能保证所有邻居目标被确认关联,因此,根据航迹关联结果,定义所有确认关联对的平均欧式距离 $\lambda(u, v)$ 为目标 u 和目标 v 的匹配度量。

$$\lambda(u, v) = \begin{cases} \frac{1}{M} \sum_{i=1, i \neq u}^{n_1} \gamma_{ij}(u, v) & M > 0 \\ \infty & M = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: j' 表示与目标 i 确认关联的传感器 2 目标; M 表示确认关联对的数量,当 $M = 0$ 时,表明在当前目标 u 和目标 v 的参照系下没有确认关联对; $\lambda(u, v)$ 越小,表

明目标 u 和目标 v 的匹配度越高,反之越低。

针对当前传感器 1 的目标 u 选择使 $\lambda(u, v)$ 达到最小的传感器 2 目标 v' ,即可判断二者为关联对,即

$$v' = \arg \min_v (\lambda(u, v)) \quad (14)$$

如果 $M = 0$,表明目标 u 不存在匹配目标,即传感器 2 未能探测到该目标,反之亦然。

因此,算法实现步骤描述如下:

1) 依次选择传感器 1 和传感器 2 的观测目标,分别建立航向参照系,按照式(4)转换各邻居目标数据;

2) 根据式(8)遍历计算不同传感器的各邻居目标之间的欧式距离;

3) 以欧式距离为检验统计量,进行全局最优的航迹关联判断,并结合距离和速度门限筛选获得确认关联对;

4) 根据式(13)计算通过关联判决的所有航迹关联对平均欧式距离作为匹配度,无关联对时则对匹配度赋无穷大值(程序实现中设置足够大的数即可);

5) 选择使 $\lambda(u, v)$ 达到最小的传感器 2 目标 v 作为传感器 1 目标 u 的匹配目标;

6) 选择传感器 1 或传感器 2 的下一个观测目标,回到步骤 1),如果传感器的目标均已遍历,则结束。

当各传感器存在非共同观测目标时,则传感器 1 和传感器 2 中存在不能关联的目标,这些目标不会通过步骤 3),将成为单部传感器的独立观测。

3 仿真分析

模拟 30 批目标在二维平面内匀速直线运动,各目标的初始位置分别在以 (70 km, 70 km) 与 (80 km, 80 km) 为对角顶点的矩形区域内按均匀分布产生,目标的初始速度和初始航向分别在 150 ~ 220 m/s 和 0 ~ 2 π 之间均匀分布。两部传感器对目标进行观测,坐标分别为 (0 km, 0 km) 和 (150 km, 0 km),测距随机误差均为 100 m,测角随机误差均为 0.3°,采样周期均为 4 s。距离门限 ε 为 5000 m,速度门限 ζ 为 30 m/s。

由于不同传感器存在不同程度的虚警和漏报,为便于统一比较,定义两部传感器对目标的共同观测率为

$$P_c = |U_1 \cap U_2| / |U_1 \cup U_2| \quad (15)$$

式中: U_1 和 U_2 分别为两传感器的航迹集合,二者的交集表示两部传感器共同观测的目标,并集表示两部传感器观测的所有目标;符号 $|\cdot|$ 表示计算集合元素的数量。可见,共同观测率指的是共同观测目标占有观测目标的比例。将本文航向参照匹配法和文献[11]中区域匹配法做 4 个对比仿真,分别验证算法对传感器虚警漏报、距离系统误差、方位系统误差以及目标分布区域大小(与仿真步长成反比)的适应性,均进

行50次蒙特卡罗仿真,每次10步。

1) 正确关联率与目标共同观测率之间的关系。两部传感器的距离系统误差均为200 m,方位系统误差分别为 3° 和 -3° ,共同观测率取值范围为50%~100%,仿真结果如图3所示。

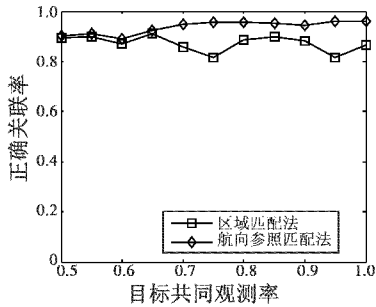


图3 正确关联率与目标共同观测率的关系

Fig. 3 The relationship between track correct association ratio and target common observation ratio

2) 正确关联率与方位系统误差之间的关系。目标共同观测率为90%,两部传感器的距离系统误差均为200 m,方位系统误差的取值范围分别为 $0^\circ \sim 5^\circ$ 和 $-5^\circ \sim 0^\circ$,仿真结果如图4所示。

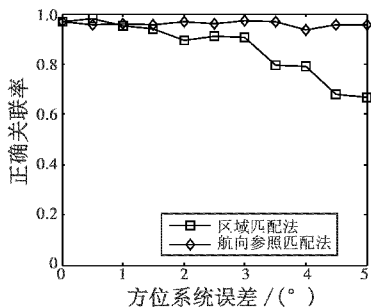


图4 正确关联率与方位系统误差的关系

Fig. 4 The relationship between track correct association ratio and systematic bias of azimuth

3) 正确关联率与距离系统误差之间的关系。目标共同观测率为90%,两部传感器的方位系统误差分别为 3° 和 -3° ,距离系统误差的取值范围为0~200 m,仿真结果如图5所示。

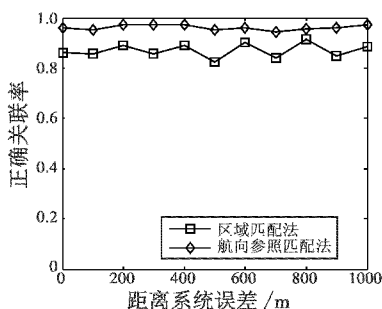


图5 正确关联率与距离系统误差的关系

Fig. 5 The relationship between track correct association ratio and systematic bias of distance

4) 正确关联率与仿真步长之间的关系。目标共同观测率为90%,两部传感器的距离系统误差均为200 m,方位系统误差分别为 3° 和 -3° ,仿真步长为10步,仿真结果如图6所示。

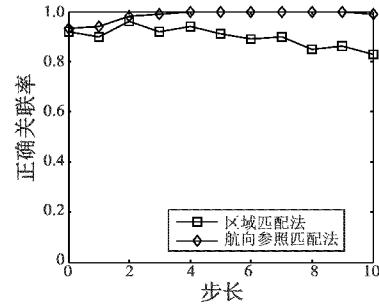


图6 正确关联率与仿真步长的关系

Fig. 6 The relationship between track correct association ratio and simulation step

由图3可见,目标共同观测率提高时,两种方法均能保持较高并略有上升的正确关联率,表明两种算法都能较好地适应各传感器存在部分非共同观测目标的情况,且航向参照匹配法的正确关联率更高。由图4可见,方位系统误差增加时,区域匹配法的正确关联率下降明显,而航向参照匹配法始终保持较高的正确关联率,这说明方位系统误差增大时,区域匹配法的匹配误差增大,而航向参照匹配法能够有效降低方位系统误差引入的匹配误差。由图5可见,距离系统误差增加时,两种方法整体保持较高的正确关联率,其中航向参照匹配法更优,表明距离系统误差对算法性能影响不大,近似认为传感器的系统误差不改变各目标之间的相对位置关系是合理的。由图6可见,随着仿真步长的增加,航向参照匹配法的正确关联率逐渐提高,而区域匹配法的正确关联率却逐渐下降。这是因为仿真推进过程中,航迹滤波后的航向精度逐渐提高,同时提高了不同传感器之间目标参照系的匹配程度;另外,目标之间密集程度逐渐降低,即目标分布在更大的区域内,使区域匹配法平移近似变换关系引入的误差进一步增大,降低正确关联率。

综上所述,本文提出的航向参照匹配法相比区域匹配法而言,充分考虑了方位系统误差引入的旋转效应,对系统误差的影响做了更为准确的近似,从而使算法在传感器存在虚警漏报、目标分布区域较广、系统误差较大等环境下具有更高的正确关联率和稳健性。

4 结论

利用传感器观测目标拓扑结构信息进行系统误差下的航迹关联与拓扑结构相似性密切相关,由于传感器不可避免存在的虚警和漏报将破坏拓扑结构相似

性,因此本文提出基于航向参照匹配的航迹抗差关联方法,在考虑传感器存在虚警、漏报问题的同时,又考虑了方位系统误差引入的旋转效应,取得了稳健的航迹关联效果,主要体现在:1) 各传感器存在虚警和漏报航迹数据的情况对正确关联率的影响不显著;2) 在传感器系统误差较大、目标分布区域较广的环境下依然能够保持较高的正确关联率。

由于算法要求对各传感器所有目标进行双重遍历判断,耗时较大,因此需要进一步研究提高算法效率;此外,算法受航向精度影响较大,因此不宜在航迹滤波尚未稳定的情况下使用。

参考文献

- [1] 何友,王国宏,陆大铨,等.多传感器信息融合及应用[M].2版.北京:电子工业出版社,2007.
HE Y, WANG G H, LU D J, et al. Multisensor information fusion with applications [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.
- [2] MORI S, CHANG K C, CHONG C Y. Comparison of track fusion rules and track association metrics [C]//The 15th International Conference on Information Fusion, Singapore, 2012:1996-2003.
- [3] BAHADOR K, KHAMIS A, KARRAY F O, et al. Multi-sensor data fusion: A review of the state-of-the-art [J]. Information Fusion, 2013, 14:28-44.
- [4] 郭蕴华,袁成.一种异步航迹关联的变异蚁群算法[J].电子学报,2012,40(11):2200-2205.
GUO Y H, YUAN C. A mutation ant colony algorithm for the asynchronous track correlation [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(11):2200-2205.
- [5] 鹿传国,冯新喜,孔云波,等.基于图的分布式平飞航迹关联算法[J].电光与控制,2012,19(10):30-33.
LU C G, FENG X X, KONG Y B, et al. Distributed formation-flying track-to-track association based on the graph [J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(10):30-33.
- [6] 石玥,王钺,王树刚,等.基于目标参照拓扑的模糊航迹关联方法[J].国防科学技术大学学报,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.
- [7] 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.
- [8] 曾昊.基于星载异类传感器的舰船编队目标数据关联方法研究[D].长沙:国防科学技术大学,2008.
ZENG H. Data association research about targets among ship formation based on heterogeneous space borne reconnaissance sensors [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.
- [9] 方亮.系统偏差条件下的航迹相关技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2009.
FANG L. Research on track correlation with system bias [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.
- [10] 宋强,熊伟,马强.基于目标不变信息量的模糊航迹对准关联算法[J].系统工程与电子技术,2011,33(1):190-195.
SONG Q, XIONG W, MA Q. Fuzzy track alignment-correlation algorithm based on target invariable information [J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(1):190-195.
- [11] 吴泽民,邱正伦,任姝婕.多传感器航迹相关的区域匹配算法[J].弹箭与制导学报,2011,31(4):210-213.
WU Z M, QIU Z L, REN S J. Area matching algorithm for multi-sensor track correlation [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2011, 31(4):210-213.
- [12] LIU X, YIN H, TIAN C, et al. An improved 2-d assignment algorithm for track-to-track association [C]//Control and Decision Conference, Guiyang, 2013:3698-3703.
- [13] KRAGEL B, HERMAN S, ROSEVEARE N. A comparison of methods for estimating track-to-track assignment probabilities [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 2012, 48(3):1870-1888.

本刊国内邮发代号为 36-693 欢迎订阅