

基于跟踪状态监视的稳健航迹关联与融合算法

董凯, 王海鹏, 刘瑜

(海军航空工程学院信息融合研究所, 山东烟台 264001)

摘要: 空间邻近目标跟踪过程中存在航迹交错现象, 传统的航迹关联与融合算法可靠性大大降低。提出基于跟踪状态监视的稳健航迹关联与融合跟踪算法: 首先, 采用滑窗式全局最优关联方法利用多帧航迹数据确认航迹关联对, 并建立系统航迹; 然后, 根据确认关联航迹的实时关联状态检测航迹交错; 最后, 根据航迹衰减残差识别运动状态, 自适应选择融合量测或者融合状态估计完成系统航迹的状态更新。仿真结果表明, 算法能够提高融合航迹精度, 实现稳健航迹关联与融合。

关键词: 航迹关联; 航迹融合; 跟踪状态监视; 空间邻近目标

中图分类号: TN957 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)01-0006-05

Robust Track Association and Fusion Algorithm with Tracking State Monitoring

DONG Kai, WANG Hai-peng, LIU Yu

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

Abstract: There exists track swap when tracking closely spaced targets, which may decrease the reliability of traditional track association and fusion algorithms greatly. Thus we proposed a robust track association and fusion algorithm with tracking state monitoring. Firstly, a sliding window global optimum association was adopted to ascertain associated track pair and establish system tracks with multiple frame track data. Then the real-time association relation of associated track pair was used to detect track swap. Lastly, track attenuated residual was used to identify maneuver in order to select the fused measurements or fused state estimation adaptively in updating state of system tracks. Simulation result shows that the proposed algorithm can improve accuracy of fusion tracks and realize robust track association and fusion.

Key words: track association; track fusion; tracking state monitoring; Closely Spaced Objects(CSO)

0 引言

空间邻近目标(Closely Spaced Objects, CSO)由于速度、航向等运动特性相似,并且目标之间距离很近,当传感器受分辨率、测量误差、跟踪算法性能等因素影响,跟踪结果容易出现航迹交错(Track Swap)问题,即估计航迹批号从一个目标错误地切换到另一目标,从而使目标身份标识混乱(Mixed Labelling)^[1-2]。而目前的研究大多从单传感器跟踪算法改进角度展开,效果难免受到单传感器性能的限制^[3-4]。分布式多传感

器融合系统能够发挥多部传感器的几何观测优势,降低目标观测的不确定性,因此,文献[5]只研究分布式融合结构下,弹道目标轨迹样条滤波后的弹道参数实时融合问题,并没有考虑可能存在航迹交错的情形;高距离分辨率雷达的一维距离像,文献[6]从中提取目标身份(Identity)信息辅助解决航迹交错问题,对传感器信源提出更多要求;文献[7]提出2-D被动多传感器航迹监视的思想,根据衰减残差和倾角差鉴别目标跟踪过程中的机动、错误数据互联和错误航迹关联,但没有进一步讨论航迹融合问题;文献[8]利用先验的关联假设修正目标身份,但没有分析航迹交错对航迹精度的影响,降低航迹关联的可靠性;文献[9]根据目标航迹关联关系的变化情况,修正关联统计量的积累时刻数,但没有分析航迹交错引起身份混乱对航迹融合的影响。

收稿日期:2014-03-10

修回日期:2014-03-30

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,研究方向为雷达数据处理、多源信息融合。

在分布式融合系统中,当一部传感器的航迹出现航迹交错问题时,往往使不同传感器的航迹关联关系发生改变,并且航迹出现伪机动状态,即表现为目标发生虚假的交错机动。因此,本文首先通过滑窗式全局最优关联建立系统航迹,然后根据监视确认航迹关联对的跟踪状态检测航迹交错,识别运动状态,自适应选择融合数据完成系统航迹状态更新,并通过仿真验证了算法的有效性。

1 问题描述

传感器跟踪航迹不仅包含目标状态估计信息,还隐含着为每个目标分配的航迹批号——用于标识不同目标观测。当多目标在运动过程中逐渐密集时,传感器难以实现可靠的点迹-航迹数据互联,出现航迹交错问题,如图 1 所示。图 1a 表示 2 个目标的真实运动航迹,目标 1 和目标 2 的间距先减小后增大;从图 1b 可见,传感器将航迹号 1 和 2 赋予 2 个目标,当二者形成空间邻近目标时,出现若干次航迹交错,2 个目标分散后,无法确定航迹号与真实目标对应关系的正确性。

分布式融合系统中,多部传感器从不同角度对目标观测跟踪,然后将航迹数据送至融合中心进行航迹关联和航迹融合。然而,传统的航迹关联算法通常假定局部传感器向融合中心传输观测目标身份可靠的状态估计及估计协方差,如果跟踪航迹中存在航迹交错问题,目标身份标识混乱将改变航迹关联关系,如图 2 所示。

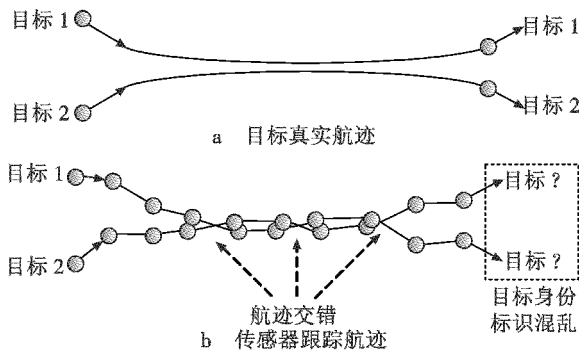


图 1 航迹交错和目标身份标识混乱示意图

Fig. 1 Track swap and mixed labelling of target identity

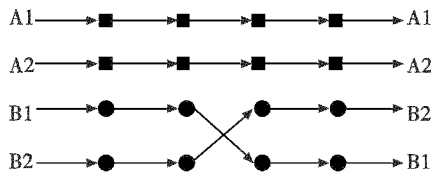


图 2 航迹交错使航迹关联关系跳变示意图

Fig. 2 Track swap changes track association relation

传感器 A 的航迹 A1 和 A2 分别与传感器 B 的航迹 B1 和 B2 关联,但是传感器 B 航迹出现航迹交错

后,航迹 A1 和 A2 则分别与航迹 B2 和 B1 关联。因此,为实现稳健的航迹关联和融合,必须对航迹交错进行检测和处理。在多传感器优化布站条件下,由于观测角度及跟踪性能不同,多传感器跟踪航迹同时发生航迹交错的概率很低,因此,这种差异性和互补性为解决该问题提供了可能。

以 2 部传感器为例,假定时空对准已完成。设 k 时刻传感器 1 的航迹 i 和传感器 2 的航迹 j 的状态估计分别为 $\hat{X}_1^i(k)$ 和 $\hat{X}_2^j(k)$, 状态估计协方差分别为 $P_1^i(k)$ 和 $P_2^j(k)$, 其中, $i=1,2,\dots,n_1, j=1,2,\dots,n_2, n_1$ 和 n_2 为对应传感器的航迹数。将航迹关联转换为假设检验问题,即假设 H_0 表示 $\hat{X}_1^i(k)$ 和 $\hat{X}_2^j(k)$ 是同一目标的状态估计;假设 H_1 表示 $\hat{X}_1^i(k)$ 和 $\hat{X}_2^j(k)$ 不是同一目标的状态估计。

经典加权航迹关联^[10]以单帧航迹数据之间的统计距离 $\alpha_{ij}(k)$ 为假设检验统计量,并判决满足给定门限的航迹对为关联航迹。

$$\alpha_{ij}(k) = [\hat{X}_1^i(k) - \hat{X}_2^j(k)]' [P_1^i(k) + P_2^j(k)]^{-1} \cdot [\hat{X}_1^i(k) - \hat{X}_2^j(k)] \quad (1)$$

如果 $\alpha_{ij}(k) \leq \delta$ (δ 为自由度,表示 n_x 的 χ^2 分布门限, n_x 为状态估计向量的维数),则接受假设 H_0 ,即判决航迹 i 和航迹 j 为关联对;否则接受假设 H_1 ,然后采用凸组合融合方法^[10]实现航迹融合。

2 算法描述

2.1 滑窗式全局最优关联与系统航迹的建立

空间邻近目标环境下,上述基于单帧航迹数据统计距离的航迹关联算法受测量误差、滤波误差等影响,关联结果往往存在不确定性,即不能在一定时间范围内保持完全一致。因此,文献[11]先后提出多种基于多帧航迹数据的航迹关联算法,本文采用时间滑窗式处理思想,在单帧航迹数据全局最优航迹关联的基础上,根据最近多帧判决结果确认航迹关联对。建立 k 时刻以 $\alpha_{ij}(k)$ 为统计量, $L(k)$ 为目标函数的二维分配模型,即

$$L(k) = \min_{\eta_{ij}(k)} \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \eta_{ij}(k) \alpha_{ij}(k) \quad (2)$$

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

$$\sum_{i=1}^{n_1} \eta_{ij}(k) = 1, \forall j = 1, 2, \dots, n_2$$

式中: $\eta_{ij}(k)$ 为二进制变量; $\eta_{ij}(k) = 1$, 表示航迹 i 和航迹 j 来自于同一目标; $\eta_{ij}(k) = 0$, 表示来自于不同目标。采用 JVC 算法^[12]求解二维分配。如果计算得到 $\eta_{ij}(k) = 1$, 且 $\alpha_{ij}(k) \leq \delta$, 则 $\eta_{ij}(k) = 1$; 否则 $\eta_{ij}(k) = 0$ 。

定义 $m_{ij}(k)$ 表示 k 时刻传感器 1 的航迹 i 与传感器 2 的航迹 j 的滑窗关联质量, 即

$$m_{ij}(k) = \sum_{l=k-R+1}^k \eta_{ij}(l) \quad m_{ij}(0) = 0 \quad (3)$$

式中, R 为滑窗长度。如果满足 $m_{ij}(k) \geq L$, L 为质量门限, 则接受假设 H_0 , 航迹 i 和航迹 j 为确认关联航迹。 R 和 L 的大小可根据实际情况调整, 一般可取 $R=6, L=4$, 此时对错漏关联的容忍度约为 33%。根据确认关联航迹建立系统航迹批号, 输出融合后的系统航迹。则系统航迹 u 的状态估计及协方差 $\hat{X}_0^u(k)$ 和 $P_0^u(k)$ ($u=1, 2, \dots, n_0, n_0$ 表示系统航迹数), 即

$$\begin{cases} \hat{X}_0^u(k) = P_0^u(k) [P_1^i(k)^{-1} \hat{X}_1^i(k) + P_2^j(k)^{-1} \hat{X}_2^j(k)] \\ P_0^u(k) = [P_1^i(k)^{-1} + P_2^j(k)^{-1}]^{-1} \end{cases} \quad (4)$$

2.2 基于确认关联航迹量测统计距离的航迹交错检测

目标跟踪过程中, 当目标发生机动, 状态估计误差会显著增大, 需要通过机动结束后多步滤波收敛才能降低误差。而航迹交错时表现为目标伪机动, 这种有偏状态估计严重影响航迹关联的可靠性, 而状态估计对应原始量测的误差不受目标机动影响, 因此可以在系统航迹建立后, 根据量测统计距离实时判断全局最优关联关系, 监视航迹关联关系是否改变。

假设 k 时刻航迹数据对应的原始量测分别为 $Z_1^i(k)$ 和 $Z_2^j(k)$, 量测协方差分别为 $R_1^i(k)$ 和 $R_2^j(k)$, 则量测统计距离为

$$d_{ij}(k) = [Z_1^i(k) - Z_2^j(k)]' [R_1^i(k) + R_2^j(k)]^{-1} \cdot [Z_1^i(k) - Z_2^j(k)] \quad (5)$$

以 $d_{ij}(k)$ 为检验统计量替换式(2)中的 $\alpha_{ij}(k)$, 根据式(2)和门限 τ (τ 表示自由度为 n_z 的 χ^2 分布门限, n_z 为量测向量维数)完成全局最优关联, 得到 k 时刻基于量测的航迹关联关系, 即假设 G_0 表示 $Z_1^i(k)$ 和 $Z_2^j(k)$ 是同一目标的量测; 假设 G_1 表示 $Z_1^i(k)$ 和 $Z_2^j(k)$ 不是同一目标的量测。

假设 G_0 成立, 则认为航迹状态正常; 假设 G_1 成立, 则认为检测到航迹交错。即当航迹关联关系改变时, 认为检测到航迹交错, 此时应取消当前时刻各状态估计值与上一时刻状态估计的互联关系, 重新进行系统航迹与量测点迹之间的数据互联、滤波更新处理。

2.3 基于航迹衰减残差的运动状态识别

检测到航迹交错后, 需要重新进行系统航迹的点迹-航迹互联、滤波更新。而由于传感器航迹交错引入伪机动将持续一定时间, 导致状态估计误差需要多步才能收敛。为提高融合航迹精度, 在状态估计误差收敛之前应使用误差相对较小的航迹对应量测数据,

之后再使用航迹状态估计数据, 因此需要对航迹运动状态进行识别。

采用 Singer 滤波模型^[10]进行机动目标跟踪, 目标机动表现在滤波残差的突变上。本文使用衰减的归一化残差平方检测目标机动, 机动目标运动方程及量测方程分别为

$$X(k+1) = F(k)X(k) + V(k) \quad (6)$$

$$Z(k+1) = H(k+1)X(k+1) + W(k+1) \quad (7)$$

式中: $F(k)$ 为状态转移矩阵; 过程噪声 $V(k)$ 为零均值、有色随机序列; $H(k+1)$ 为量测矩阵; $W(k+1)$ 为具有协方差矩阵 $R(k)$ 的量测噪声矩阵。衰减的归一化残差平方为

$$\beta(k) = \mu\beta(k-1) + \varepsilon_v(k) \quad (8)$$

$$\varepsilon_v(k) = v'(k) [S(k)^{-1}] v(k) \quad (9)$$

$$v(k) = Z(k) - H(k-1)F(k-1)\hat{Z}(k-1) \quad (10)$$

$$S(k) = H(k)P(k|k-1)H'(k) + R(k) \quad (11)$$

式中: μ 为 0 和 1 之间的衰减系数, $\mu = 1 - 1/s$, s 为滑窗长度, 且 $0 < \mu < 1$; $v(k)$ 和 $S(k)$ 分别为滤波残差及其协方差; $P(k|k-1)$ 为预测协方差; β 为具有 $n_z(1 + \mu)/(1 - \mu)$ 个自由度的近似 χ^2 分布随机变量^[7]。设 β_{\max} 为给定显著性水平下的 χ^2 门限, 当确认关联航迹对中任一条航迹的衰减残差超过门限, 则认为航迹处于机动状态, 否则认为处于非机动状态。

2.4 基于运动状态的自适应融合

假设 k 时刻检测到航迹交错存在不可靠航迹, 不能直接航迹关联融合, 可对 $k-1$ 时刻的系统航迹与 k 时刻融合处理后的点迹数据之间进行点迹-航迹数据互联处理。根据 2.1 节可以获得 k 时刻关联航迹融合的状态估计及其协方差 $\hat{X}_0^l(k|k)$ 和 $P_0^l(k|k)$, 根据 2.2 节可以获得 k 时刻关联量测融合值及其协方差 $\hat{Z}_0^l(k)$ 和 $R_0^l(k)$, 即

$$\hat{Z}_0^l(k) = R_0^l(k) [R_1^i(k)^{-1} Z_1^i(k) + R_2^j(k)^{-1} Z_2^j(k)] \quad (12)$$

$$R_0^l(k) = [R_1^i(k)^{-1} + R_2^j(k)^{-1}]^{-1} \quad (13)$$

式中: $l(l=1, 2, \dots, n_f)$ 为融合点迹号; n_f 为融合点迹数。本文将 k 时刻融合量测与 $k-1$ 时刻系统航迹进行数据互联更新的方法称为量测融合法; 将 k 时刻融合状态估计与 $k-1$ 时刻系统航迹进行数据互联更新的方法称为状态估计融合法; 本文采用自适应融合法, 即根据航迹运动状态识别结果, 在非机动时采用状态估计融合法, 机动时采用量测融合法。算法流程如图 3 所示。

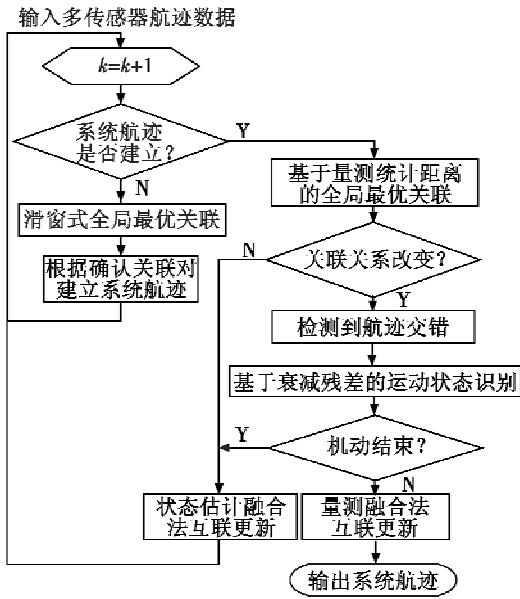


图 3 稳健航迹关联与融合算法流程图
Fig. 3 Flow chart of robust track association and fusion algorithm

3 仿真分析

由于传统的航迹关联融合法没有考虑航迹交错问题,当航迹存在航迹交错问题时,误差与交错目标间距成正比,因此,仅比较考虑了航迹交错问题的 3 种基于跟踪状态监视的算法:量测融合法、状态估计融合法和自适应融合法。蒙特卡罗仿真 100 次,每次仿真 40 步,前 10 步用于确认航迹关联并建立系统航迹(仿真结果图中未包含),传感器 1 航迹在第 16 步出现航迹交错。目标在平行运动过程中经历匀速转弯机动过程(第 16~20 步)。机动跟踪过程采用 Singer 模型,其机动时间常数取 20 s,加速度方差取 10 m/s^2 ,航迹关联和数据互联的门限显著性水平取 0.01,衰减系数 $\mu = 0.1$ 。

2 部 2D 传感器分别位于(0 km, 0 km) 和(60 km, 0 km),扫描周期均为 2 s,测距误差为 50 m,测角误差为 0.1° ,2 个目标间距分两种情况, $d = 500 \text{ m}$ 和 $d = 200 \text{ m}$,其中之一初始位置为(30 km, 10 km),目标初始速度均为 60 m/s,初始航向均为 0° 。给出 2 种目标间距条件下传感器跟踪航迹、目标真实航迹和融合航迹,仿真结果如图 4、图 5 所示;各算法处理得到的融合航迹位置和速度均方根误差(RMS)如图 6~图 9 所示;2 种目标间距条件下的融合航迹平均误差(位置和速度 RMS 平均值),如表 1 所示。

由图 4 可见,传感器 1 跟踪航迹在目标转弯机动时出现航迹交错,并且交错后的航迹偏差经过若干步滤波才降低。从图 5 可见,本文的稳健航迹关联与融

合算法能够处理航迹交错情形,得到目标身份正确的融合航迹。

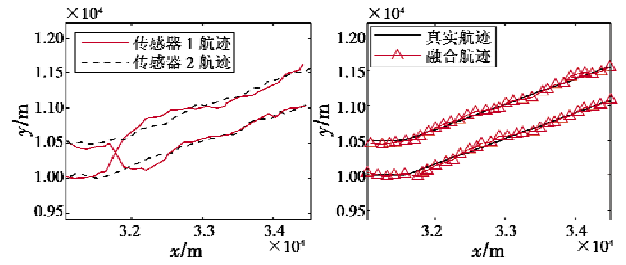


图 4 传感器 1 和传感器 2 航迹($d = 500 \text{ m}$)
图 5 目标真实航迹与融合航迹($d = 500 \text{ m}$)
Fig. 4 Tracks of sensor 1 and sensor 2 when $d = 500 \text{ m}$
Fig. 5 Targets' true tracks and fusion tracks when $d = 500 \text{ m}$

图 6、图 7 分别为目标间距 500 m 时融合航迹位置均方根误差和速度均方根误差的仿真结果,由图可见,出现航迹交错时,状态估计融合法的融合航迹误差突然增大,明显高于量测融合法,通过多步滤波,误差才逐渐降低,并且低于量测融合法。而自适应融合法能够根据运动状态的变化情况及时切换选择更优的算法,从而降低融合航迹总误差。图 8、图 9 分别为目标间距 200 m 时的位置均方根误差和速度均方根误差的仿真结果,可见自适应融合法的优势更为明显。

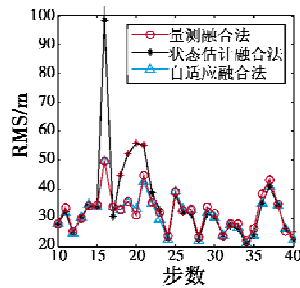


图 6 目标位置均方根误差($d = 500 \text{ m}$)
Fig. 6 RMS of target position when $d = 500 \text{ m}$

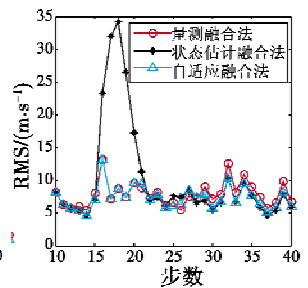


图 7 目标速度均方根误差($d = 500 \text{ m}$)
Fig. 7 RMS of target velocity when $d = 500 \text{ m}$

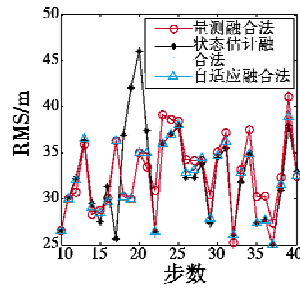


图 8 目标位置均方根误差($d = 200 \text{ m}$)
Fig. 8 RMS of target position when $d = 200 \text{ m}$

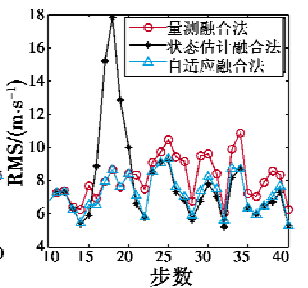


图 9 目标速度均方根误差($d = 200 \text{ m}$)
Fig. 9 RMS of target velocity when $d = 200 \text{ m}$

表 1 给出目标间距分别为 500 m 和 200 m 时仿真时

间段内各算法的融合航迹平均位置误差和速度误差。

表 1 融合航迹平均误差

Table 1 Average error of fusion track

间距/m	RMS 类型	量测融合法	状态估计融合法	自适应融合法
500	位置/m	32.906 7	35.834 8	32.399 6
	速度/(m·s ⁻¹)	7.900 4	10.164 0	7.374 1
200	位置/m	32.804 4	32.539 9	32.008 0
	速度/(m·s ⁻¹)	8.113 0	7.883 3	7.227 5

由表 1 可见,自适应融合法的平均误差均小于量测融合法和状态估计融合法,表明该算法能够提高航迹交错条件下的融合航迹精度。同时对比可见,间距减小时,状态估计融合法的平均误差改善明显,并且接近于自适应融合法,这是因为目标间距减小使航迹交错引入的伪机动减弱,进而使自适应融合法保持为状态融合法的时间更长,而量测融合法主要受测量误差的影响(测量误差通常大于滤波误差),平均误差变化不大。

4 结论

传统的航迹关联和融合算法没有考虑空间邻近目标跟踪过程中存在的航迹交错问题,导致可靠性大大降低。为此,提出一种基于跟踪状态监视的稳健航迹关联与融合算法,根据航迹关联关系的变化情况实时检测航迹交错问题,并根据航迹衰减残差监视机动情况以采用自适应的融合方法。仿真结果表明,本文提出的算法能够有效处理空间邻近目标存在航迹交错问题的情形,提高融合航迹的精度,实现稳健航迹关联与融合。

参 考 文 献

[1] KORN J, HOLTZ H, FARBER M S. Trajectory estimation of closely spaced objects (CSO) using infrared focal plane data of an STSS (space tracking and surveillance system) platform [C]//Signal and Data Processing of Small Targets, Orlando, USA, 2004;387-399.

[2] BOERS Y, SVIESTINS E, DRIESSEN H. Mixed labelling in multi-target particle filtering [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 2010, 46(2):792-802.

[3] AOKI E H, BOERS Y, SVENSSON L, et al. A Bayesian look

at the optimal track labelling problem [C]//The 9th IET Data Fusion & Target Tracking Conference: Algorithms & Applications, London, UK, 2012;1-6.

- [4] PANAKKAL V P, VELMURUGAN R. Iterative joint probabilistic data association for avoiding track coalescence and track swap in multi-target tracking [C]//The 7th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop, Hoboken, USA, 2012;285-288.
- [5] 谢美华,王正明.基于样条模型的多传感器目标跟踪算法研究[J].宇航学报,2005,26(3):291-295. (XIE M H, WANG Z M. Algorithm research for multi-sensor target tracking based on spline model [J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(3):291-295.)
- [6] LANCASTER J, BLACKMAN S. Joint IMM/MHT tracking and identification for multi-sensor ground target tracking [C]//The 9th International Conference on Information Fusion, Italy, 2006;1-7.
- [7] ROECKER J A. Track monitoring when tracking with multiple 2-D passive sensors [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1991, 27(6):872-876.
- [8] DANU D G, SINHA A, KIRUBARAJAN T. Track-to-track association using informative prior associations [C]//Signal and Data Processing of Small Targets, San Diego, USA, 2007;1-10.
- [9] 林两魁.天基红外传感器对中段弹道目标群的跟踪与超分辨技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2011. (LIN L K. Tracking and super-resolution for midcourse ballistic target complex via space-based infrared sensors [D]. Changsha:National University of Defense Technology, 2011.)
- [10] BAR-SHALOM Y, FORTMANN T E. Tracking and data association [M]. New York:Academic Press, 1988.
- [11] 何友,王国宏,陆大镛,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.)
- [12] MALKOFF D B. Evaluation of the Jonker-Volgenant-Castanon (JVC) assignment algorithm for track association [C]//Proceedings of Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition Orlando, FL, 1997;228-239.

本刊国内邮发代号为 36-693 欢迎订阅