

文章编号: 1001-0920(2008)02-0171-06

红外搜索跟踪系统的数据关联算法研究

韩崇昭, 李 晨, 朱洪艳

(西安交通大学 电子与信息工程学院, 西安 710049)

摘 要: 针对红外搜索跟踪系统(IRST)在单站情况下,对目标进行纯方位跟踪时存在的问题,提出一种数据关联算法.首先根据红外探测器的量测信息特点,从不同角度构造多组证据;然后采用证据组合规则对这些信息进行综合;最后通过极大化基本可信度赋值函数(BPAF)得到关联结果.这种基于 D-S 证据理论的数据关联算法,由于合理利用多源量测信息,有效地克服了传统方法处理数据不确定性时存在的问题.蒙特卡罗仿真结果表明,该算法具有较好的关联效果.

关键词: 红外搜索跟踪系统; 纯方位跟踪; 数据关联; 证据理论

中图分类号: TN953

文献标识码: A

Data association algorithm of infrared search and track system

HAN Chong-zhao, LI Chen, ZHU Hong-yan

(Institute of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China.

Correspondent: LI Chen, E-mail: lynnlc@xjtu.edu.cn)

Abstract: For a single observation of infrared search and track (IRST) system, a new data association algorithm of passive tracking is proposed. Firstly, according to the measurements of infrared sensor, several kinds of evidences are constructed from different views. Then the information of multiple features are fused by using D-S combining rule. Finally, the association results are obtained by maximizing the basic probability assignment function (BPAF). By utilizing different information of the measurements reasonably, the new data association algorithm based on D-S evidence theory overcomes the problem of uncertain data in the traditional methods. The simulation results show that the proposed approach has better performance in data association.

Key words: Infrared search and track; Bearing-only tracking; Data association; Evidence theory

1 引 言

红外搜索与跟踪(IRST)系统是一类重要的无源探测系统.自 20 世纪 80 年代起在少数发达国家海军舰船中使用,属于正在开发的大型军用红外设备.IRST 系统的主要作用是在夜间或在能见度很差的白天和烟雾情况下,向中控系统提供目标指示数据.它采用热点跟踪方式对目标进行探测跟踪,通常只能提供目标角度量测的信息.但与雷达系统相比,它具有隐蔽性好、抗干扰能力强等优点.

由于缺乏距离信息,红外目标跟踪属于被动跟踪.这个问题的实质就是目标的纯方位跟踪^[1,2].它在点迹-航迹关联、跟踪滤波等方面与雷达数据的处理有很大不同,难度也很大,在国际上都是极具挑战性的课题.事实上,利用红外探测器不仅可以得到获取的目标方位量测,还可以获得目标的红外辐射强

度或目标灰度等重要信息.如何利用这些特征数据来提高目标关联的性能,国内外的文献尚不多见^[3,4].文献[3]给出了一种把目标红外辐射强度信息纳入到数据关联中的方法,但它还是一种构建于贝叶斯框架下的算法,对于数据本身不确定因素的处理并不是很合理.这就导致了算法虽然纳入了更多信息,但对关联效果的提高并不是很明显.

Dempster-Shafer(也称 D-S)证据理论,满足比概率论更弱的公理体系,并且在区分不确定及精确反映证据收集过程等方面显示了很大的灵活性.它不需要很多先验信息,即可提供一个非常有用的合成公式,能够融合多个证据源提供的证据.其在数据融合中的身份识别方面已经得到了广泛应用^[5],但在数据关联中的应用并不是很多^[6,7].

本文借鉴文献[7,8]的思想,充分利用红外探测

收稿日期: 2006-11-06; 修回日期: 2007-03-23.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60574033).

作者简介: 韩崇昭(1943—),男,西安人,教授,博士生导师,从事信息融合、非线性系统理论等研究; 李晨(1981—),女,西安人,博士生,从事目标跟踪滤波估计、数据关联等研究.

器可提供的量测,提出一种综合目标多特征信息的数据关联算法.该算法从目标方向角、红外光谱辐射功率、角加速度等方面构造出不同的证据基础,对已有信息进行处理,并应用(D-S)证据合成规则对结果进行融合,有效解决量测与航迹的关联问题.仿真结果表明,该算法能有效地处理传感器数据的不确定性,较之文献[9,10]采用的最近邻(NN)方法和概率数据关联(PDA)方法,关联性能得到了提高.

2 基于 D-S 证据理论的数据关联算法

2.1 问题描述

IRST 系统主要用于远距离飞行目标的搜索和跟踪(距离 r 一般大于 15 km),目标作机动飞行的可能性非常小,另外 IRST 系统采样速率较高,加上目标指示精度高(通常为 1 mrad),因而可以假定在各帧扫描间,目标方位角和俯仰角的变化近似为线性的^[2,9,10].这样在跟踪滤波时,选取极坐标系为跟踪坐标系,方位角和俯仰角是解耦的,可以直接进行线性卡尔曼滤波.

定义状态变量为

$$= [\quad]^T, \quad (1)$$

记角度量测变量为

$$z = [m \quad m]^T.$$

假设在杂波环境下已有 T 个目标,每个采样点上对每个目标的观测由源于目标的量测及源于杂波的几个量测共同组成,则在极坐标下对应的状态方程和量测方程分别为

$$\begin{cases} t(k) = t(k-1) + \mathcal{S}(k-1), \\ z_j(k) = H(k) t(k) + (k), \end{cases} \quad t = 1, 2, \dots, T, j = 1, 2, \dots, m_k. \quad (2)$$

其中: $t(k)$ 代表 k 时刻目标 t 的状态向量; $z_j(k)$ 表示传感器在 k 时刻的第 j 个量测向量; $t(k-1)$, $H(k)$ 是在采样区间 $(t_{k-1}, t_k]$ 中已知的线性系统矩阵;状态噪声 $\mathcal{S}(k-1)$ 和量测噪声 (k) 为互不相关的零均值高斯白噪声,协方差阵分为 $t(k-1)$, $R(k)$.

记传感器在 k 时刻的有效量测集为

$$Z(k) := \{ z_1(k), z_2(k), \dots, z_{m_k}(k) \},$$

其中 m_k 为由传感器生成的有效量测的总数目.传感器从初始时刻到时刻 k 的有效量测集为 $Z^k := \{ Z(1), Z(2), \dots, Z(k) \}$,记其中从属于目标 t 的有效量测集为 Z^k .

2.2 证据理论的概要及系统模型建立

D-S 证据理论用识别框架 O 表示所感兴趣的命题集, $P(O)$ 表示 O 的幂集,定义 O 上的基本可信度赋值函数(BPAF) $m: P(O) \rightarrow [0, 1]$, 满足

$$\begin{cases} m(\Phi) = 0, \\ \sum_{A \in \mathcal{A}} m(A) = 1. \end{cases} \quad (3)$$

命题 A 为 O 的非空子集,称为焦元, $m(A)$ 反映了对 A 的信任度大小. m_1, \dots, m_n 分别对应同一识别框架 O 下由 n 个独立的证据源导出的 BPAF, 则利用下面的 Dempster 组合规则可以计算这 n 个证据共同作用下的 BPAF:

$$\begin{cases} m(\Phi) = 0, \\ m(A) = \frac{\prod_{i=1}^n m_i(A_i)}{1 - \sum_{A_i \neq \Phi} \prod_{i=1}^n m_i(A_i)} = \frac{\prod_{i=1}^n m_i(A_i)}{\prod_{A_i \neq \Phi} m_i(A_i)}. \end{cases} \quad (4)$$

基于证据理论的数据关联,实质上是在同一框架下将不同的证据体合并成一个新的证据体的过程,进而判定跟踪门内的各个有效观测与真实目标的相关联程度的过程.这里假设各目标航迹已经起始,每次扫描时将产生两种可能:量测要么来源于已有目标,要么来源于杂波或新的目标.在每次作出这种关联假设时构建假设空间 $O = \{ T_o, T_u \}$. 其中: T_o 代表量测来源已有目标, T_u 代表量测不是来源于已有目标.那么此时 $P(O) = \{ \Phi, T_o, T_u, O \}$, 其中: Φ 表示不可能事件:“既来源已有目标,又不来源已有目标”; O 表示事件:“可能是来源已有目标,又可能不是来源已有目标”.下面就在此识别框架 O 进行 BPAF 的推导.

2.3 构造基于不同证据的 BPAF

IRST 系统除可以提供目标的角度量测,还可给出其在某一波长范围内的红外光谱辐射功率.在此将充分利用这些信息,构造关于量测与目标预测状态统计距离、红外辐射强度及角加速度的特性的证据向量.在进行数据关联时,数据关联的正确性与各个特征信息权重的选择有着直接的关系.对上述 3 种证据的权重分配要视具体情况而定,分别以 a_1, a_2, a_3 表示,它们满足归一化条件,即 $a_1 + a_2 + a_3 = 1$ (一般取 $a_1 > a_2 > a_3$).下面给出其构造方法.

2.3.1 基于角度量测与目标预测值间的统计距离信息的 BPAF

$\wedge^t(k/k-1)$, $t(k/k-1)$ 分别为第 k 次采样时刻,目标 t 的已知角度预测状态及其协方差阵.由它的波门中第 j 个有效量测产生的新息为

$$r_j^t(k) = z_j(k) - H(k) \wedge^t(k/k-1), \quad t = 1, 2, \dots, T, j = 1, 2, \dots, m_k. \quad (5)$$

新息协方差阵为

$$S^t(k) = H(k) t(k/k-1) H(k) + R(k),$$

$$t = 1, 2, \dots, T. \tag{6}$$

那么各有效量测与预测状态的统计 Mahalanobis 距离为

$$d_j^t(k) = r_j^t(k) S^t(k) r_j^t(k), \tag{7}$$

$$t = 1, 2, \dots, T, j = 1, 2, \dots, m_k.$$

由于状态噪声和量测噪声服从独立的高斯分布,那么 $r_j^t(k)$ 也服从高斯分布^[11],且 $d_j^t(k)$ 服从自由度为 n_z 的 χ^2 概率分布(n_z 代表量测的维数).那么 $z_j(k)$ 源于既有目标 t 的概率为

$$P_j = 1 - \int_0^{d_j^t} \frac{1}{2^{\frac{n_z}{2}} \Gamma(\frac{n_z}{2})} \exp(-\frac{d}{2}) d^{\frac{n_z}{2}-1} dd, \tag{8}$$

$$j = 1, 2, \dots, m_k.$$

基于目标角度量测的BPAF记为 m_1 ,它对假设集 $\{T_o, T_u\}$ 的BPAF定义为

$$m_1(T_o^t) = a_1 P_j, m_1(T_u^t) = a_1 (1 - P_j), \tag{9}$$

$$t = 1, 2, \dots, T, j = 1, 2, \dots, m_k.$$

可以看出 d_j^t 越小, $m_1(T_o^t) = a_1 P_j$ 越大,该量测源于目标 t 的可信度越高.

2.3.2 基于红外光谱辐射功率的 BPAF

假定 k 时刻目标 t 与探测器间的距离为 $r^t(k)$,则红外探测器探测到的该目标红外光谱辐射功率 P 满足如下关系:

$$P(k) = \frac{J A_0 e^{-\alpha r^t(k)}}{r^t(k)^2}, t = 1, 2, \dots, T. \tag{10}$$

其中: J 为目标在探测波段内的红外光谱辐射强度, α 为该波段的大气衰减系数, A_0 为光学系统接收面积.

在各帧扫描间,由于目标较远, J 可以被认为是恒值,那么两次扫描期间的红外光谱辐射强度的变化应在一较小范围之内.当某一量测对应的 $P(k)$ 和上一时刻得到的目标 P 差值过大时,对应量测为杂波的可能性就越大.基于目标红外光谱辐射强度的BPAF记为 m_2 ,它对假设集 $\{T_o, T_u\}$ 的BPAF定义为

$$m_2(T_u^t) = a_2 P_u = \begin{cases} a_2, & |P - I_m| > \mu; \\ a_2 \mu, & \text{其他}; \end{cases} \tag{11}$$

$$m_2(T_o^t) = a_2 (1 - P_u).$$

其中: I_m 是在两次采样间隔 P 变化的最大值,与传感器的扫描频率及目标 J 有关; μ 是预先设定的(0, 1)间的值,可根据实际情况进行调整.

本文利用目标红外光谱辐射强度信息,可以直接排除那些源于杂波或其他目标的量测,即判定它们不可能是真实量测的程度.故此处定义的是“量测不是来源于目标”的基本可信度赋值函数值,而非“量测来源于目标”的基本可信度赋值函数值.

2.3.3 基于目标角加速度信息的 BPAF

已知目标在运动时,它的角加速度 $(\ddot{\theta}, \ddot{\phi})$ 的值也有一定的范围,通常比较小.这里虽然目标的角加速度不可以直接获得,但可通过目标角度估计值获得其近似值.如果根据某量测估算出此次扫描的角加速度值较大,那么它多半来源于杂波.

下面给出基于目标角速度信息对假设集 $\{T_o, T_u\}$ 的BPAF定义,即

$$m_3(T_u^t) = a_3 P_u = \begin{cases} a_3, & |\dot{\theta}| > a_m \text{ 或 } |\dot{\phi}| > a_m; \\ a_3, & \text{其他}; \end{cases} \tag{12}$$

$$m_3(T_o^t) = a_3 (1 - P_u).$$

其中: a_m 是角加速的最大值,一般在 10^{-4} 数量级以下取值; a_3 是预先设定的(0, 1)间的值,可根据实际情况进行调整.

2.4 证据合成及关联决策

假设落在单个跟踪门中的有效观测个数为 m_k^t ,对于第 j 个有效观测(可能为杂波或干扰),在得到基于不同证据的BPAF,再利用式(4)得到综合后的基本可信度赋值函数为

$$m_j^t(T_o^t) = \frac{\prod_{i=1}^3 m_i(B)}{\prod_{B: \phi_i=1} m_i(B)}, \tag{13}$$

$$t = 1, 2, \dots, T, j = 1, 2, \dots, m_k^t.$$

选择具有最大组合BPAF值的假设所对应的观测为关联点迹^[7],即

$$z^t(k) = \arg \max_z m_j^t(T_o^t), \tag{14}$$

$$t = 1, 2, \dots, T, j = 1, 2, \dots, m_k^t.$$

整个算法流程如图 1 所示.

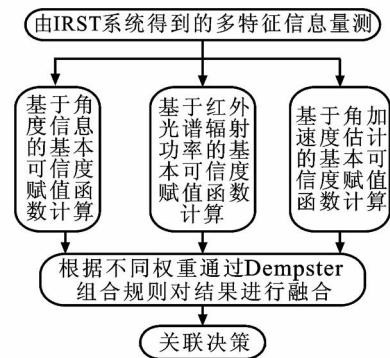


图 1 算法流程图

3 仿真实验与分析

3.1 仿真条件

本节给出两个典型场景用于进行本文所述关联算法和最近邻算法(NN)^[9,10]及概率数据关联算法(PDA)的性能比较.场景 1 为杂波环境下 3 个在

角度域中航迹有交叉的弱机动目标,3 个目标的初始状态设定如表 1 所示. 假定各目标在 XYZ 方向上皆作匀速运动. 图 2 描述了场景 1 下各目标角度域轨迹.

表 1 场景 1 下各目标初始状态

目标	r_x km	v_x m/s	r_y km	v_y m/s	r_z km	v_z m/s
1	- 22	- 100	1	100	6	- 15
2	19	90	5	- 100	5	10
3	20	- 100	4	120	4	10

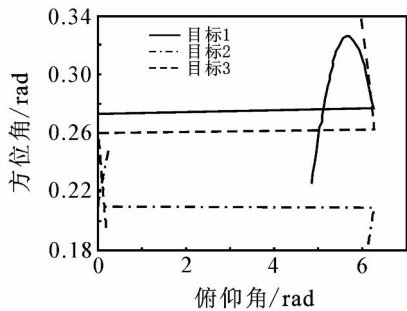
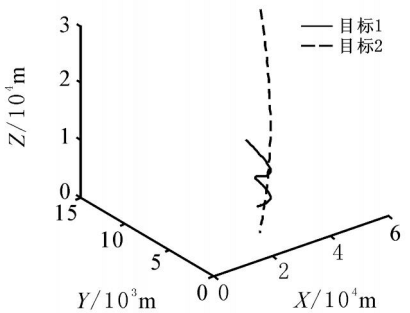
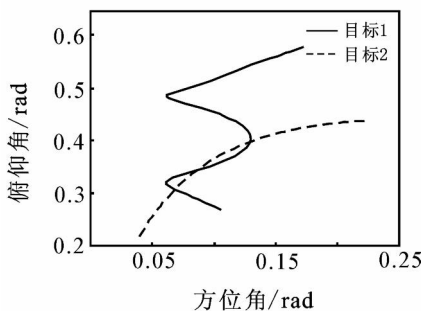


图 2 场景 1 下目标的角度域轨迹

场景 2 为杂波环境下空域中飞机目标和导弹目标同时出现时的情况. 其中目标 1 飞机起始状态设为 $X_{10} = [22 \text{ km}, 100 \text{ m/s}, 0 \text{ m/s}^2, 2.5 \text{ km}, - 100 \text{ m/s}, 0 \text{ m/s}^2, 6 \text{ km}, 150 \text{ m/s}, 0 \text{ m/s}^2]$. 假定它的轨迹在 $0 \sim 10 \text{ s}$ 间为匀加速运动 (10 m/s^2), $10 \sim 50 \text{ s}$ 间在 X - Y 平面作一个转弯 (0.21 rad/s), 在 $50 \sim 60 \text{ s}$ 作匀速直线运动 (320 m/s). 目标 2 导弹处于介入阶段, 它的运动轨迹由文献 [12] 中的连续运



(a) 场景 2 目标的空域运动轨迹



(b) 场景 2 目标的角度域轨迹

图 3 场景 2 的空域航迹及角度域航迹

动函数采用 Rung-Kutte 方法进行离散化后得到. 它们的空域航迹及角度轨迹如图 3(a) 和 3(b) 所示.

仿真中所用的目标角度状态数据是先在直角坐标系下, 用递推的方法得到其每一时刻 X, Y, Z 方向的数据, 再按角度和距离信息的关系导出各时刻目标的角度信息, 此处得到角度的单位为 rad. 设目标的红外光谱辐射强度 $J = 500 \text{ Wsr}^{-1/13}$, 红外探测器的探测距离为 20 km , 利用距离信息可计算出每时刻的各目标光谱辐射功率.

跟踪算法采用直接角度域建模方法, 并且选择 CV 单一转换模型. 状态噪声假设为已知的高斯白色噪声, 噪声系数选为 0.01 .

量测矩阵取

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

设测量噪声都是协方差已知的高斯白色噪声, 角度噪声系数为 0.008 , 光谱辐射功率测量噪声取为 $1 \times 10^{-8} \text{ W}$. 假设传感器都位于坐标原点. 两种场景下, 采样间隔 $T = 1 \text{ s}$, 扫描次数 60 次, 探测器的检测率取为 $P_D = 1$.

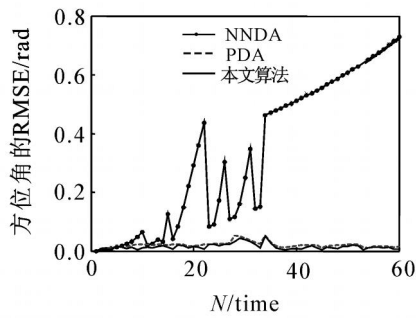
为了产生虚假量测, 假定杂波在探测区内服从参数 $\lambda = 4 \times 10^{-5} / \text{mrad}^2$ 的泊松分布, 对于杂波信号的红外光谱功率值则通过参数为 10^{-7} 的瑞利分布生成. 并且取 $P_G = 0.99999$.

仿真的硬件环境为 CPU 奔腾 4, 主频为 1.1 GHz , 内存为 256 M 的 PC 机. 仿真的软件环境为 Windows XP 平台上的 Matlab 语言.

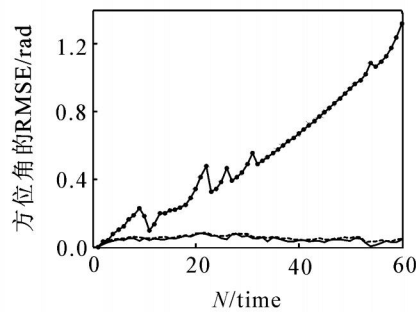
3.2 仿真结果及分析

两种场景下各通过 50 次蒙特卡罗仿真, 结果如图 4, 图 5 和表 2, 表 3 所示. 图 4 比较了在场景 1 下, 本文提及的关联算法和 PDA 算法以及 NNDA 算法对目标 3 跟踪时方位角及俯仰角的 RMSE 指标. 图 5 比较了在场景 2 下, 上述 3 种算法对飞机目标 1 跟踪时方位角及俯仰角的 RMSE 指标. 表 2 列出了 3 种算法在整个采样区间内对两种场景下各个目标的角度平均 RMSE 比较. 表 3 则比较了在目标数及杂波密度不同时 NN 算法和本文算法的关联正确率.

从以上结果可看出, 随着杂波密度和目标数的增大, 本文算法合理地利用了多样的证据源, 尽可能排除了杂波的干扰, 故较之 NN 算法和 PDA 算法, 关联及跟踪精度更高, 并且由于 3 种算法的计算复杂度都是多项式级的, 新算法的计算量没有显著增大, 关联优势较明显. 但本算法由于引入了目标的红外光谱辐射信息和角加速度信息, 只有当目标类型差别比较大, 或距离比较远时算法优越性明显; 而当目标同类型距离较近时, 本算法性能和 PDA 算法区

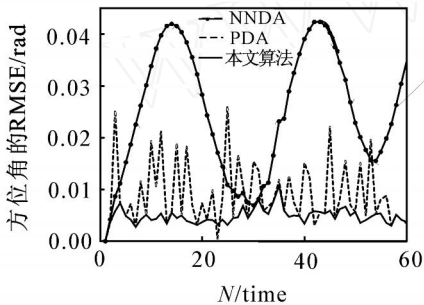


(a) 目标 3 的方位角的 RMSE 比较

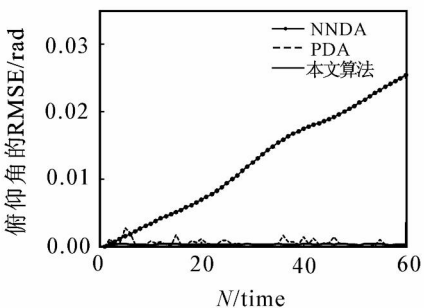


(b) 目标 3 的俯仰角的 RMSE 比较

图 4 场景 1 下新算法和以前算法比较



(a) 目标 1 的方位角的 RMSE 比较



(b) 目标 1 的俯仰角的 RMSE 比较

图 5 场景 2 下新算法和以前算法比较

别不大。另外,对于不同的杂波密度和目标数,取值较小时(经验值 0.001),算法性能较好;但当 0.05 时,算法优势基本丧失,关联成功率与 PDA 方法相当。

表 2 在不同场景下各个目标全采样周期平均的角度 RMSE 比较

算法	目标	场景 1			场景 2	
		1	2	3	1	2
本文算法	A	0.015 8	0.012 1	0.092	0.005 4	0.004 8
	E	0.003 1	0.003 2	0.003 2	0.003 9	0.002 9
PDA	A	0.016 4	0.012 7	0.013 6	0.008 0	0.007 3
	E	0.003 8	0.005 9	0.003 6	0.005 6	0.006 9
NN	A	0.054 0	0.056 5	0.280 9	0.023 3	0.087 3
	E	0.015 6	0.031 3	0.167 9	0.084 0	0.065 1

注:A - 方位角,E - 俯仰角

表 3 目标数及杂波密度不同时 NN 和 PDA 算法与本文算法的关联正确率比较

杂波密度 mrad ²	目标数	关联正确率 / %		
		3	5	7
4 × 10 ⁻⁶	本文算法	98.66	97.59	97.01
	PDA	97.06	95.08	94.17
	NN	90.48	88.60	86.53
4 × 10 ⁻⁵	本文算法	95.07	93.91	92.98
	PDA	90.07	88.21	85.73
	NN	60.95	57.98	54.77
8 × 10 ⁻⁵	本文算法	90.66	89.14	89.01
	PDA	82.25	78.23	74.12
	NN	50.23	42.41	35.52

4 结 语

本文针对红外探测器的特点,提出了一种基于证据组合规则的量测-航迹关联的新方法。该算法结构简单,需要先验信息少,适用于目标跟踪的实时应用。但很多参数是事先取定,对关联准确率的影响比较大,故今后研究将集中在如何根据目标运动机动性自适应地调整某些设定参数。

参考文献(References)

[1] Nardone S C, Aidala V J. Observability criteria for bearing-only target motion analysis [J]. IEEE Trans on AES, 1981, 17(2): 162-166.

[2] Ito M, Tsujimichi S, Kosuge Y. Tracking a three-dimensional moving target with two-dimensional angular measurements from multiple passive sensors[C]. 38th Annual Conf Proc of the SICE Annual. Morioka, 1999: 28-30; 1117-1122.

[3] 胡磊力,陈钰清,丁贤澄,等.一种多目标跟踪起始和数据关联的快速算法[J]. 光电与控制,2000,80(4): 5-9.

(Hu Lei-li, Chen Yu-qing, Ding Xian-cheng, et al. Fast algorithm for track initiation and data association in multiple target tracking [J]. Electronics Optics & Control, 2000, 80(4): 5-9.)

- [4] 黄常青, 郑链, 宋承天. 红外多目标跟踪算法研究[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(2): 188-191.
(Huang Chang-qing, Zheng Lian, Song Cheng-tian. Infrared multitarget tracking algorithm[J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(2): 188-191.)
- [5] Duy H Nguyen, John H Kay, Bradley J Orchard, et al. Feature-aided tracking of moving ground vehicles [C]. Proc of SPIE on Algorithms for Synthetic Aperture Radar. Orlando, 2002: 234-245.
- [6] Dang Hong-she, Han Chong-zhao. Multi-target data association approach for vehicle tracking in road situation[C]. Proc of 2003 IEEE Int Conf on Intelligent Transportation Systems. Shanghai, 2003, 1: 379-383.
- [7] Jiang Jing; Guo Jing, Luo Peng-fei, et al. Multisensor multiple-attribute data association[C]. CIE Int Conf of Radar. Beijing, 1996: 393-396.
- [8] 王杰贵, 罗景青. 基于多目标多特征信息融合数据关联的无源跟踪方法[J]. 电子学报, 2004, 4(32): 1013-1016
(Wang Jie-gui, Luo Jing-qing. Passive tracking based on data association with information fusion of multi-feature and multi-target [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 4(32): 1013-1016.)
- [9] 潘丽娜. 红外警戒系统中的数据互联算法[J]. 红外与激光工程, 1998, 27(6): 5-7.
(Pan Li-na. Data association algorithms for infrared surveillance systems [J]. Infrared and Laser Engineering, 1998, 27(6): 5-7.)
- [10] 王学伟, 何友. 舰载红外警戒系统多目标跟踪算法研究[J]. 火力与指挥控制, 1999, 24(1): 38-41.
(Wang Xue-wei, He You. A multitarget tracking algorithm of shipborne infrared surveillance system[J]. Fire Control & Command Control, 1999, 24(1): 38-41.)
- [11] Kailath T. An innovation approach to least-square estimation: Part I[J]. IEEE Trans on AC, 1968, 13(6): 645-655.
- [12] Farina A, Ristic B, Benvenuti D. Tracking a ballistic target: Comparison of several nonlinear filters [J]. IEEE Trans on AES, 2002, 38(3): 854-867.
- [13] 钱铮铁. 一种用于红外警戒系统的被动测距方法[J]. 红外与毫米波学报, 2001, 20(4): 311-314.
(Qian Zheng-tie. Passive ranging method for IRST systems[J]. J of Infrared and Millimeter Waves, 2001, 20(4): 311-314.)

(上接第 170 页)

- [4] Liang Y W, Liaw D C, Lee T C. Reliable control of nonlinear systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2000, 45(4): 706-710.
- [5] Wu H N. Reliable LQ fuzzy control for nonlinear discrete-time systems via LMIs [J]. IEEE Trans on System, Man Cybernetics B, 2004, 34(2): 1270-1275.
- [6] Zhang H, Quan Y. Modeling, identification and control of a class of nonlinear system[J]. IEEE Trans on Fuzzy System, 2001, 9(2): 349-354.
- [7] Zhang H, Wang Z. Chaotifying fuzzy hyperbolic model using adaptive inverse optimal control approach[J]. Int J Bifurcation and Chaos, 2004, 14(10): 3505-3517.
- [8] Margaliot M, Langholz G. A new approach to fuzzy modeling and control of discrete-time systems[J]. IEEE Trans on Fuzzy System, 2003, 11(4): 486-494.
- [9] 张化光, 全永兵. 基于模糊双曲正切模型的一类稳定的模糊控制器设计[J]. 控制与决策, 2002, 17(6): 956-957.
(Zhang Hua-guang, Quan Yong-bing. Design of stable fuzzy controller based on fuzzy hyperbolic model [J]. Control and Decision, 2002, 17(6): 956-957.)
- [10] Yang J, Liu D, Feng J, et al. Controller design for a class of nonlinear systems based on fuzzy hyperbolic model[C]. Proc of the 6th World Congress on Control and Automation. Dalian, 2006: 873-877.
- [11] Zhang H, Yang J. Delay-dependent stability of a class of nonlinear systems with time delays based on fuzzy hyperbolic model[C]. ICIC 2006. LNAI 4114, 2006: 20-31.
- [12] Boyd S, Ghaoui L E, Feron E, et al. Linear matrix inequalities in system and control theory [M]. Philadelphia: SIAM, 1994.
- [13] Chu Y C, Glover K. Bounds of the induced norm and model reduction errors for systems with repeated scalar nonlinearities[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1999, 44(3): 471-483.