

舰载红外警戒系统的单站多目标数据关联与滤波算法

李 晨, 韩崇昭, 徐林海, 朱洪艳

(西安交通大学 电子与信息工程学院 综合所, 陕西 西安 710049)

摘要: 针对舰载红外警戒系统和所观测目标的特点, 本文提出一种单站被动式跟踪系统的数据关联滤波算法. 首先选取极坐标系建模使系统方程得到简化, 然后基于启发式规则进行航迹起始, 并给出纯角度域下的联合概率数据关联算法(JPDA), 接着分析变量在角度域的变化规律, 结合实际对算法进行修正从而完成交互多模型(IMM)的跟踪滤波. 不同的仿真场景被给出用于验证该算法的性能, 蒙特卡罗仿真结果表明该算法的有效性.

关键词: 红外警戒系统; 纯方位跟踪; 联合概率数据关联; 交互多模型

中图分类号: TP951, TP391 **文献标识码:** A

Data association and tracking algorithm for a shipborne infrared surveillance system

LI Chen, HAN Chong-zhao, XU Lin-hai, ZHU Hong-yan

(Electronic & Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China)

Abstract: Based on the characteristics of the infrared sensor and targets, we propose a tracking algorithm for a single passive sensor system. The polar coordinates are adopted in modeling the system for simplicity. A method based on heuristic rules is utilized to initiate the track, and the joint probability data association (JPDA) in the bearing-only field is presented. Based on the variation rule of the angular vectors, we make a modification to the algorithm and implement the interacting multiple model (IMM) tracking filter. Several simulating scenarios are provided to verify the performance of the algorithm, and the simulation results demonstrate the validity of the new method.

Key words: infrared surveillance system; bearing-only tracking; JPDA; IMM

1 引言(Introduction)

舰载红外警戒系统, 又叫舰载红外搜索与跟踪(IRST)系统, 是一类重要的无源探测系统. 它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式跟踪问题. 本系统通过对红外搜索系统给出的角度量测进行估计, 基于此结果启动激光测距仪, 最终获得准确的距离量测信息, 构成完整的探测跟踪系统. 本文着重讨论IRST系统的数据关联跟踪算法.

2 跟踪坐标系的选取(Filtering coordinates)

借鉴文献[1~3]中的思想, 笔者来对问题进行简化. 由于IRST系统主要用于远距离飞行目标的搜索和跟踪, 这时目标作机动飞行的可能性非常小. 而且IRST系统采样速率及目标指示精度较高. 故把跟踪坐标系选为极坐标系, 认为在各帧扫描间, 目标的方位角和俯仰角为渐变的, 那么方位角和俯仰角也

就是解耦的, 可以进行线性滤波.

定义状态变量为

$$\zeta = [\theta \dot{\theta} \ddot{\theta} \varphi \dot{\varphi} \ddot{\varphi}]^T. \quad (1)$$

记量测为 $z = [\theta_m \varphi_m]^T$.

假设在杂波环境下已有 T 个目标, 则在极坐标下对应的状态方程和量测方程分别为

$$\begin{cases} \zeta^t(k) = \Phi^t(k-1)\zeta^t(k-1) + \vartheta(k-1), \\ z_j(k) = H(k)\zeta^t(k-1) + v(k), \\ t = 1, 2, \dots, T, j = 1, 2, \dots, m_k. \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\zeta^t(k)$ 表示 k 时刻目标 t 的状态, $z_j(k)$ 表示传感器在 k 时刻的第 j 个量测向量, $H(k)$ 是在采样区间 $(t_{k-1}, t_k]$ 的已知系统矩阵, 状态噪声 $\vartheta(k-1)$ 和量测噪声 $v(k)$ 为互不相关的零均值高斯白噪声, 协方差阵分为 $\Theta(k-1)$, $R(k)$.

3 多目标航迹起始与航迹终结(Track initiation and termination)

设 $\theta^i(k-1)$, $\varphi^i(k-1)$ 为 $k-1$ 时刻目标 i 的航迹点, $\theta_j(k-1)$, $\varphi_j(k-1)$ 为 k 时刻某一确定量测, 那么如果同时满足下面两式建立目标 i 的二维航迹和它的航迹号:

$$\begin{cases} |\theta^i(k-1) - \theta_j(k)| \leq T\dot{\theta}_{\max}, \\ |\varphi^i(k-1) - \varphi_j(k)| \leq T\dot{\varphi}_{\max}. \end{cases} \quad (3)$$

其中: $\dot{\theta}_{\max}$ 为方位角角速度最大值; $\dot{\varphi}_{\max}$ 为俯仰角角速度最大值.

若有多个量测满足启发规则, 做分叉处理, 即有 n 个相关点就起始 n 条航迹, 且为每一航迹都形成后续相关波门, 继续检验. 连续进行3次这样的筛选, 只要有某一次量测点不满足初始相关判决条件, 则停止检验并删除此航迹, 转入下一疑似航迹检验. 若相邻的两个报告发生冲突, 则把检验报告分配给互联点迹少的疑似航迹. 图1为航迹起始的流程.

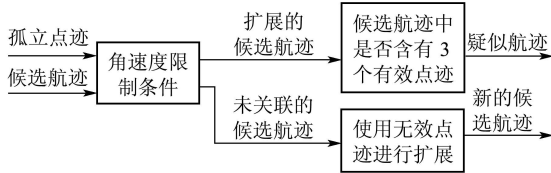


图1 航迹起始流程

Fig. 1 Process of track initiation

航迹终结是航迹起始的逆过程, 其解法与航迹起始相似. 如果根据预测估计建立的波门, 连续3次没有量测落入, 则中止该航迹, 并删除该航迹编号.

4 波门的选取(Validation of measurements)

设在 k 时刻扫描时得到 $b(k)$ 个量测, 如果由传感器送来的角度量测 i 与已经建立的二维航迹 t 满足下式, 则该观测就可以和该航迹关联, 记该时刻属于目标 t 的确认量测总数为 $m^t(k)$:

$$\begin{cases} |z_i(k) - \hat{z}^t(k|k-1)| \leq Kg \cdot \sigma_r, \\ i = 1, \dots, m^t(k), t = 1, \dots, T. \end{cases} \quad (4)$$

其中 $z_i(k)$, $\hat{z}^t(k|k-1)$, Kg 及 σ_r 定义同文献[4].

5 基于纯角度信息的被动式IMM-JPDA关联跟踪算法(Passive IMM-JPDA based on bearing-only measurement, PIMMJPDA)

假定目标某时刻的运动定可以用 n 个假设模型中的一个进行描述. 设航迹起始后已得到 T 个目标航迹, 上一时刻的第 j 个模型概率为, 那么在 k 时刻的混合概率可以表示为

$$\begin{cases} \mu^{i|j,t}(k-1|k-1) = \frac{1}{c_j} p_{ij} \mu^{i,t}(k-1), \\ i, j = 1, \dots, n, t = 1, \dots, T. \end{cases} \quad (5)$$

其中 $c_j = \sum_{i=1}^n p_{ij} \mu^{i,t}(k-1)$.

假定已知各个目标 $k-1$ 时刻基于每个模型的估计值及其协方差 $\hat{x}^{j,t}(k-1|k-1)$, $P^{j,t}(k-1|k-1)$, $j = 1, \dots, n$, $t = 1, \dots, T$, 则 k 时刻每个模型的滤波输入 $x_0^{j,t}(k-1)$, $P_0^{j,t}(k-1)$ 计算详见文献[4]. 通过一步预测可得各个模型预报状态 $\hat{x}^{j,t}(k|k-1)$ 及其协方差阵 $P^{j,t}(k|k-1)$ 以及混合状态预报 $\hat{x}^t(k|k-1)$ 及其协方差阵 $P^t(k|k-1)$. 这里由于角度的取值只能在 $[0, 2\pi]$ 之间, 不能直接采用线性跟踪法, 须采用笔者在以前的研究[5]中的修正方法, 对状态变量进行处理, 再进行后续滤波.

设 k 时刻共形成 $c(k)$ 个聚, 第 d 阵中包含的量测数和目标数分为 $m^{c(d)}(k)$, $T^{c(d)}(k)$. 那么该时刻总的确认量测数为 $m(k)$, $m(k) = \sum_{d=1}^{c(k)} m^{c(d)}(k)$, 而总目标数满足 $T = \sum T^c(k)$, 且 $m(k) \leq \sum_{t=1}^T m^t(k)$. 那么该时刻模型的似然函数如下[6]:

$$\begin{aligned} \Lambda^{j,t} &= [V^t(k)]^{-m^t(k)} \gamma_0(m^t(k)) + [V^t(k)]^{-m^t(k)+1} \cdot \\ &\sum_{i=1}^{m^t(k)} P_G^{-1} \mathcal{N}[v_i^{j,t}(k); 0, S^{j,t}(k)] \gamma_i(m^t(k)), \\ j &= 1, \dots, n, t = 1, \dots, T. \end{aligned} \quad (6)$$

各参量定义详见文献[6]. 该时刻的模型概率为

$$\begin{aligned} \mu^{j,t}(k) &= \frac{1}{c} \Lambda^{j,t}(k) \sum_{i=1}^n p_{ij} \mu^{i,t}(k-1) = \\ &\frac{1}{c} \Lambda^{j,t}(k) c_j, j = 1, \dots, n, t = 1, \dots, T. \end{aligned} \quad (7)$$

c 为归一化常数.

设第 d 个($d = 1, \dots, c(k)$)聚阵中包涵的量测数和目标数分为 $m^{c(d)}(k)$, $T^{c(d)}(k)$, 那么这 $T^{c(d)}(k)$ 个目标的对第 j 个模型的估计值可按文献[4]中方法计算. 对于每一个模型 j 计算可行事件($l = 1, \dots, L$)的相应概率 $P^j(\theta_l|Z^k)$, 这里 Z^k 表示到 k 时刻为止全部有效回波的集合.

$$\begin{aligned} P^j(\theta_l|Z^k) &= \frac{\lambda^{\pi(l)}}{c} \prod_{i=1}^{m^{c(d)}} [\mathcal{N}[v_i^{t(i)}(k); 0, S^t(k)] \cdot \\ &\prod_{t=1}^{T^{c(d)}} (P_D)^{\delta_t(l)} (1 - P_D)^{1-\delta_t(l)}, \\ l &= 1, \dots, L, j = 1, \dots, n. \end{aligned} \quad (8)$$

其中: $v_i^t = z_i(k) - \hat{z}^t(k|k-1)$, $i = 1, \dots, m^{c(d)}(k)$, $t = 1, \dots, T^{c(d)}(k)$. 由式(8)得到关联概率

$$\begin{cases} \beta_i^{j,t} = \sum_{l=1}^L P(\theta_l|Z^k) \hat{\omega}_i^t(\theta_l), \\ i = 1, \dots, m^{c(d)}(k), \\ t = 1, \dots, T^{c(d)}(k), j = 1, \dots, n. \end{cases} \quad (9)$$

基于此可得各个模型的滤波估计 $\hat{x}^{j,t}(k|k)$ 及其协方差阵 $P^{j,t}(k|k)$ [7].

综合每个模型的估计得到最终的状态估计

$$\hat{x}^t(k|k) = \sum_{j=1}^n x^{j,t}(k|k) \mu^{j,t}(k), \quad t=1, \dots, T, \quad (10)$$

$$P^t(k|k) = \sum_{j=1}^n \mu^{j,t}(k) \{ P^{j,t}(k|k) + [\hat{x}^{j,t}(k|k) - \hat{x}^t(k|k)][\hat{x}^{j,t}(k|k) - \hat{x}^t(k|k)]', \\ t=1, \dots, T. \quad (11)$$

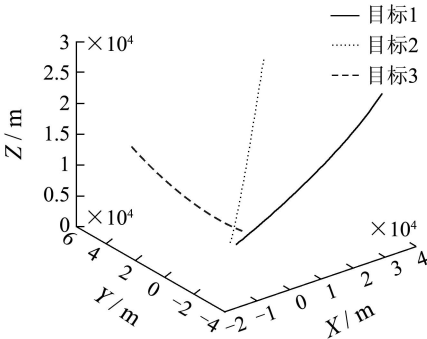
文献[6]指出一般任何机动运动都可以由若干个CV与CA模型综合逼近,在角度域CT模型不具有任何物理意义,ω的取值更无法确定. 所以在此只选用状态噪声不同的CV与CA模型进行多模型的建模.

6 仿真实验及结果分析(Simulation and analysis)

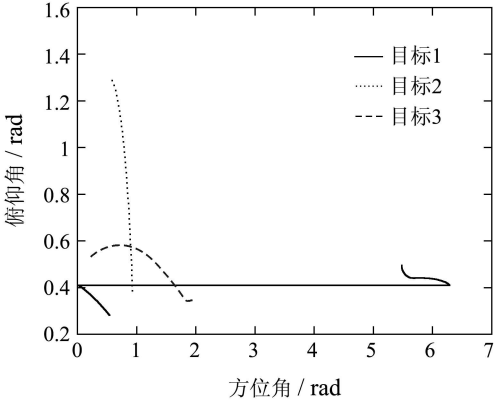
为了说明算法性能给出3个算例. 算法的硬件仿真环境为CPU奔腾4,主频为1.1 GHz,内存为256 M的PC机. 仿真的软件环境为Windows XP平台上的MATLAB语言.

算例1给出杂波环境下3个在角度域中有交叉目标用来比较本文所述关联算法和最近邻关联算法^[2,7]的性能. 目标的运动轨迹见图2.

跟踪算法采用直接角度域建模方法跟踪,并且选择CV单一转换模型. 状态噪声假设为高斯白色噪声,噪声系数选为0.1. 量测矩阵取 $H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$,设测量噪声是的高斯白色噪声,噪声系数为0.006. 传感器位于坐标原点. 采样间隔 $T = 1.5\text{ s}$,取 $P_D = 1$. 假定杂波 $\lambda = 4 \times 10^{-5}/\text{mrad}^2$ 的泊松分布. $P_G = 0.99999$. 仿真结果如图3及表1所示(蒙特卡罗50次).

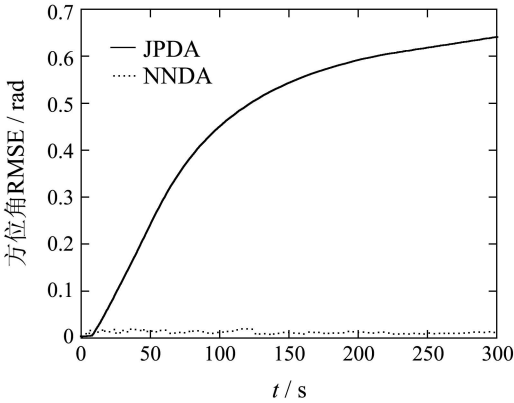


(a) 直角坐标系

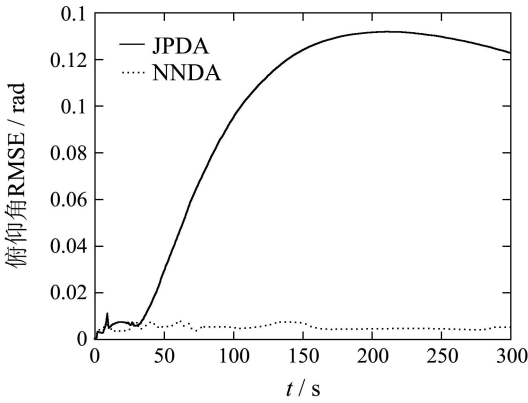


(b) 角度域

图2 目标的运动轨迹
Fig. 2 Trajectories of targets



(a) 目标3的方位角RMSE



(b) 目标3的俯仰角RMSE

图3 JPDA和NNDA的比较结果
Fig. 3 Comparison of JPDA and NNDA

表1 对于所有目标在全采样周期平均的角度RMSE比较

Table 1 Comparison of the average angle RMSE in the whole sampling period

算法	目标1		目标2		目标3	
	A/rad	E/rad	A/rad	E/rad	A/rad	E/rad
JPDAF	0.0025	0.0020	0.0029	0.0019	0.0034	0.0024
NNDAF	0.0045	0.0022	0.0049	0.0021	0.6825	0.1679

注: A为方位角; E为俯仰角.

算例2是给出一个作高度机动的目标用于进行IMM算法和其中每一种单一模型进行跟踪的性能比较. 目标的运动轨迹如图4. 图5描述了目标角度随时间变化曲线.

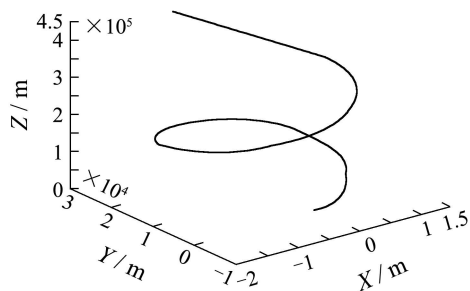


图4 直角坐标域轨迹

Fig. 4 The trajectories in Cartesian coordinates

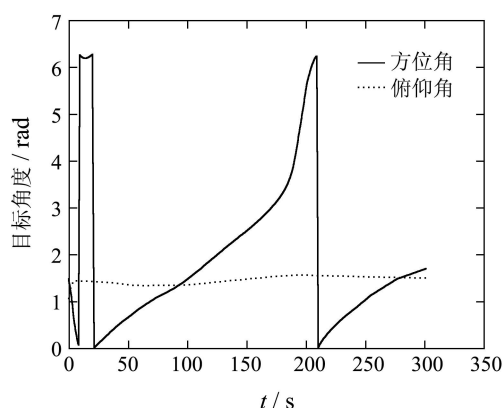
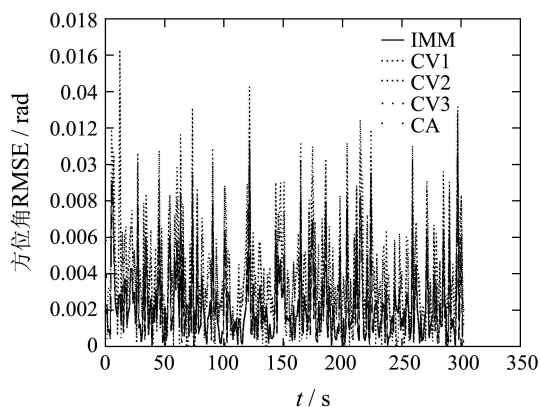


图5 角度随时间变化曲线

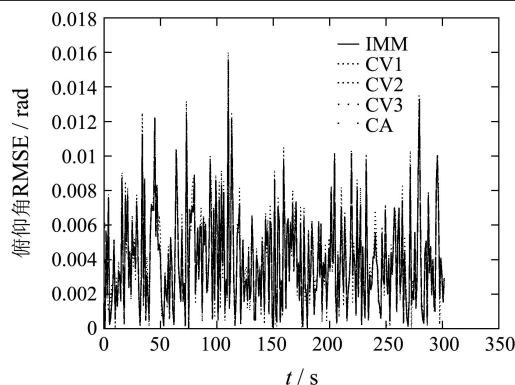
Fig. 5 The angular curves

在多模型算法中, 选取了3个模型进行跟踪. 这3个模型分别为: 模型1,2为 Q 阵不同的匀速(CV)模型(状态噪声系数分为1,0.01), 模型3为匀加速(CA)模型(状态噪声系数取为0.1). 初始的模型概率阵为 $\mu_0 = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \end{bmatrix}$. 模型转换概率矩阵

为 $H = \begin{bmatrix} 0.98 & 0.01 & 0.01 \\ 0.01 & 0.98 & 0.01 \\ 0.01 & 0.01 & 0.98 \end{bmatrix}$. 仿真结果见图6及表2.



(a) 方位角的 RMSE 比较



(b) 俯仰角的RMSE比较

图6 IMM算法以及其中每个单一模型跟踪算法性能比较

Fig. 6 Performance comparison between IMM and other single model algorithms

表2 对于所有目标在全采样周期平均的角度RMSE比较

Table 2 Comparison of the average angle RMSE in the whole sampling period

算法	IMM	CV1	CV2	CA
方位角RMSE/rad	0.0036	0.0138	0.0138	0.0100
俯仰角RMSE/rad	0.0036	0.0036	0.0038	0.0038

表3 仿真时间比较

Table 3 Comparison of simulation time

算法	IMM	CV1	CV2	CA
时间/s	1.0813	0.0422	0.0422	0.0406

算例3给出杂波环境下5个在角度域中有交叉目标来对本文PIMM-JPDA关联跟踪算法进行性能评估. 各个目标的运动轨迹如图7.

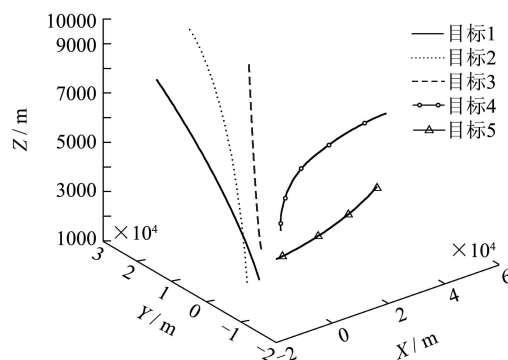


图7 各个目标的运动轨迹

Fig. 7 Trajectories of multiple targets

状态噪声等参数选择同算例2中IMM模型. 量测矩阵及杂波密度等参数同算例1. 仿真结果如图8及表5所示.

从算例1的结果可以清楚看出, 采用纯角度

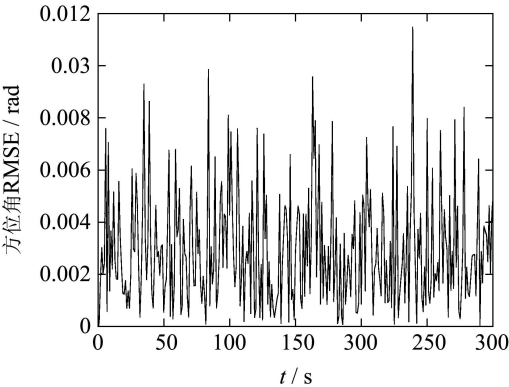
域的JPDA算法在排除重度杂波干扰方面确实比NDA算法更稳定, 且在角度域中机动变化幅度越大效果提高越明显. 从算例2的仿真结果可以清楚的看到采用多模型算法后, 确实能对提高算

法精度有帮助, 但多模型算法确实要比一般的单一模型跟踪算法要大, 实际应用中在确保跟踪精度的前提下, 应尽量减小模型集的规模, 以此来减小运算量.

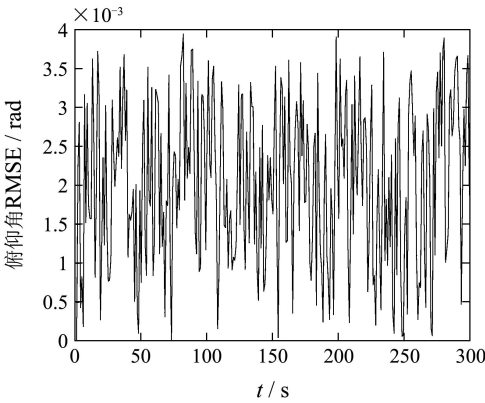
表 4 对于5个目标在所有采样周期取平均后的角度RMSE

Table 4 Comparison of the average angle RMSE in the whole sampling period

目标	目标 1	目标 2	目标 3	目标 4	目标 5
方位角RMSE/rad	0.0031	0.0021	0.0029	0.0028	0.0026
俯仰角RMSE/rad	0.0019	0.0029	0.0020	0.0019	0.0020



(a) 方位角的RMSE



(b) 俯仰角的RMSE

图 8 目标1跟踪性能结果

Fig. 8 Performance of tracking target 1

7 结论(Conclusion)

作为舰载全方位红外警戒系统研制的创新性课题, 本文借鉴了雷达多目标跟踪的理论和方法, 详细讨论了单站被动式传感器跟踪算法. 对于舰载IRST, 考虑到平台的特点和目标的低机动性, 引入了新的纯角度域的关联跟踪方法. 以角度和角速率为状态变量, 取极坐标作为跟踪坐标系. 在航迹起始中采用了适合角度量测基于启发式规则的方法, 并用 JPDA方法实现了后续点迹与航迹的关联. 最后引入修正状态变量的 IMM跟踪算法到纯方位的跟踪中, 实现了对角度变量的状态更新. 仿

真结果表明这套多目标跟踪算法的有效性. 未来的研究重点将集中在构建新的更适合角度域的模型及关联算法的改进等问题.

参考文献 (References):

[1] ITO M, TSUJIMICHI S, KOSUGE Y. Sensor-to-sensor target association in a network of passive sensors [J]. *Proceedings of the 23rd International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, 1997, 3(9/14): 1260 – 1264.

[2] 王学伟, 王何友. 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 Xuewei, HE You. A multitarget tracking algorithm of shipborne infrared surveillance system[J]. *Fire Control & Command Control*, 1999, 24(1): 38 – 41.)

[3] 潘丽娜. 舰载红外全方位警戒系统中的多目标起始和滤波算法[J]. *光电对抗与无缘干扰*, 1998, 17(2): 19 – 23.
(PAN Lina. A track initiation and filtering algorithm of shipborne infrared surveillance system in multitarget tracking[J]. *Electro-optic Warfare & Radar Passive Countermeasures*, 1998, 17(2): 38 – 41.)

[4] BAR-SHALOM Y, FORTMAN T E. *Tracking and Data Association*[M]. Boston: Academic Press, 1988.

[5] 李晨, 韩崇昭, 朱洪艳, 等. 基于被动式传感器的目标跟踪算法研究[J]. *光电工程*, 2006, 33(9): 5 – 9.
(LI Chen, HAN Chongzhao, ZHU Hongyan, et al. Target tracking algorithm for single passive sensor[J]. *Opto-electronic Engineering*, 2006, 33(9): 5 – 9.)

[6] RONG X L, VESSELIN P. A survey of maneuvering target tracking-part V: multiple-model methods[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 41(4): 1255 – 1321.

[7] 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 Lina. Data association algorithms for infrared surveillance systems[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1998, 27(6): 5 – 7.)

作者简介:

李 晨 (1981—), 女, 博士生, 研究方向为目标跟踪、数据关联等, E-mail: lynnlc@163.com;

韩崇昭 (1943—), 男, 博士生导师, 研究方向为信息融合、非线性系统理论等, E-mail: czhan@mail.xjtu.edu.cn;

徐林海 (1970—), 男, 讲师, 研究方向为机动目标跟踪等, E-mail: xlh@xjtu.edu.cn;

朱洪艳 (1974—), 女, 副教授, 研究方向为最优控制、多传感信息融合等, E-mail: hyzhu@mail.xjtu.edu.cn.