

文章编号: 1002-0411(2002)02-185-03

# 受限工作模式下航迹融合多目标跟踪算法研究

程咏梅 潘 泉 张洪才

(西北工业大学自动控制系 西安 710072)

**摘 要:** 针对实际目标跟踪系统中, 传感器工作常常受到限制, 以满足跟踪精度和隐蔽性双重要求的工程应用问题. 研究了杂波环境下, 采用红外(主传感器)始终工作、雷达(辅传感器)间歇工作的特殊传感器工作模式, 红外\雷达双传感器航迹融合多目标跟踪算法及实现. 仿真表明可以达到跟踪精度与隐蔽能力兼顾的系统要求.\*

**关键词:** 红外/雷达航迹融合; 特殊传感器工作模式; 多目标跟踪

中图分类号: TP13

文献标识码: B

## A STUDY OF MULTITARGET TRACKING ALGORITHM WITH TRACK FUSION UNDER A CONFINED WORK MODE

CHENG Yong-mei PAN Quan ZHANG Hong-cai

(Dept. of Automatic Control, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** In the practical multitarget tracking system, the good tracking accuracy and the good concealment always are demanded at the same time, but the infrared-radar data fusion system could hardly meet this demand before. Therefore, in this paper, the problem of multitarget tracking in cluttered environment by infrared-radar track fusion with infrared as the main sensor(always work) and radar as the subsidiary sensor (intermission work) has been thoroughly studied. Under the condition of the special sensor work mode, large amount of simulation work is done to prove the effectiveness and unique advantages of the above system.

**Keywords:** infrared-radar track fusion, special sensor work mode, multitarget tracking

### 1 引言(Introduction)

数据融合给目标跟踪系统带来了许多特殊效益, 因此, 在目标跟踪中得到大量地应用, 并已建立起各种目标跟踪数据融合系统<sup>[1, 2]</sup>. 以往关于数据融合跟踪的研究, 大多集中在多个传感器均能同时利用的前提下进行. 而在实际的复杂战争环境下进行目标跟踪, 由于受多传感器管理及决策的影响, 战场环境的限制, 以及提高生存能力等的要求, 多个传感器均能同时利用的理想条件往往难以实现. 因此研究传感器工作受限下的数据融合跟踪, 对实际工程应用具有非常重要的意义.

本文假设在单机平台上装有雷达、红外两种传感器, 要求既要获得很好的跟踪效果, 又要保持良好的隐蔽性. 在这种条件下, 通常的多个传感器均能同时利用的数据融合跟踪系统已不再适用. 因为, 有源

传感器雷达主动发射电磁波、易暴露, 它的工作必须受到一定的限制, 以保证系统良好的隐蔽性. 但是, 雷达又不能完全关闭, 因为, 红外虽隐蔽性好, 测角精度高, 但在很多情况属纯角度跟踪, 导致跟踪出现强非线性、弱可观测性等问题, 因而滤波稳定性差, 容易发散, 并且容易发生数值奇异现象, 同时还对观测站的运动方式提出了一定的要求, 以增强系统的可观测性; 而雷达的测距精度高, 信息量大, 跟踪算法比较成熟, 正是红外被动式跟踪的有益补充. 采用红外为主, 雷达为辅的数据融合系统进行目标跟踪有利于更充分地发挥红外、雷达两种传感器的互补性, 使其相得益彰. 与通常的融合系统相比, 具有实用、可靠性好、不易暴露、系统生存能力强等独到优势, 在战场环境较为恶劣的情形下, 是目标跟踪的一种优良工程实现方案.

\* 收稿日期: 2000-08-22  
基金项目: 航空科学基金资助(99D53041)

## 2 系统组成及工作原理 (System architecture and work principle)

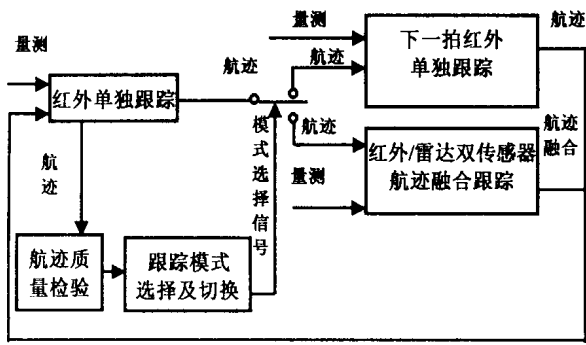


图1 系统结构图

Fig. 1 System architecture figure

1) 红外单独跟踪模块: 采用伪线性卡尔曼滤波算法<sup>[4,5]</sup>进行红外被动式跟踪。

2) 红外/雷达双传感器航迹融合跟踪模块: 采用了如图2所示的分布式融合体系结构, 该模块主要包括三大部分: 红外跟踪器, 雷达跟踪器和航迹关联及航迹融合中心。红外跟踪器应用的滤波算法同1), 雷达跟踪器应用扩展卡尔曼滤波算法<sup>[4,5]</sup>进行跟踪, 航迹关联及航迹融合中心完成航迹-航迹关联及融合。

3) 航迹质量检验模块: 用残差分析法检验航迹质量。

4) 跟踪模式选择和切换模块: 跟踪模式的选择逻辑为: 假若航迹质量“好”, 则在下一拍选用红外单独跟踪模式。假若航迹质量“不好”, 则在下一拍选用红外/雷达双传感器航迹融合跟踪模式。

整个系统的工作原理: 红外单独跟踪模式作为初始模式进行目标跟踪, 由航迹质量检验模块针对红外跟踪性能进行评估, 再由模式选择和切换逻辑功能模块根据上述评估结果完成两种跟踪模式之间的切换, 然后由所选用的跟踪模块继续进行滤波, 接着再返回至红外单独跟踪, 这样不断循环, 周而复始。

## 3 算法实现(Algorithm implementation)

本系统要解决的关键问题: 航迹质量检验算法

本系统由下列模块组成(如图1所示):

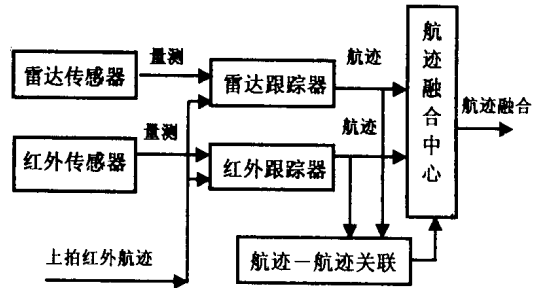


图2 红外/雷达航迹融合跟踪

Fig. 2 Infrared-radar track fusion tracking

及红外/雷达异步工作航迹-航迹的关联及融合算法

### 3.1 航迹质量检验算法

本系统选用 JPDAF 方法<sup>[5]</sup>完成多目标多杂波跟踪中的量测与航迹的关联。假设  $\beta_l^j(k)$  为目标  $l$  与有效回波  $j$  的关联概率,  $Z_l^j(k)$  为与目标  $l$  相关联的有效回波  $j$ ,  $H_l(k)$  为对应于目标  $l$  的量测矩阵,  $\hat{X}_l(k|k-1)$  为目标  $l$  的状态一步预测值,  $m_k$  为有效回波个数, 定义检验航迹质量统计量

$$d_l(k) = \sum_{j=1}^{m_k} \beta_l^j(k) [z_l^j(k) - H_l(k) X_l(k|k-1)] \quad (1)$$

或等价地

$$d_l(k) = \sum_{j=1}^{m_k} \beta_l^j(k) z_l^j(k) - H_l(k) X_l(k|k-1) \quad (2)$$

定义

$$C^l = \frac{1}{N^l} \sum_{n=0}^{N^l-1} d_l(k-n)^T S_l^{-1}(k-n) d_l(k-n) \quad (3)$$

其中,  $S_l(k-n)$  为目标  $l$  的新息协方差阵,  $d_l(k-n)$  通过具有固定  $N^l$  值的滑动窗口来选用, 以保证  $C^l$  中始终包含最新  $N^l$  拍的信息。量  $N^l C^l$  近似服从自由度为  $MN^l$  的  $\chi_{MN^l}^2$  分布,  $M$  为观测维数。并且  $C^l$  的均值和标准差分别为

$$E(C^l) = M \quad (4)$$

$$\sigma_c^l = \frac{2M}{N} \quad (5)$$

因此,可通过对  $C^l$  进行假设检验来检验航迹质量. 多目标多杂波跟踪中航迹质量检验算法可表述如下

假设“ $H_0$ : 航迹质量‘好’”; “ $H_1$ : 航迹质量‘不好’”. 当

$$M - \alpha^l \sigma_c^l < C^l < M + \alpha^l \sigma_c^l \quad (6)$$

成立时,接受“航迹质量检验‘好’”的假设,否则,不接受. 其中,  $\alpha^l$  为一决定置信区间长度的系数,其大小根据实际情况选取.

### 3.2 红外/雷达异步工作航迹关联与航迹融合算法

传感器同时工作时,分布式融合体系结构的航迹关联与航迹融合算法参见[2],这里,称它为一般航迹关联和航迹融合算法. 假设雷达的采样间隔是红外采样间隔的整数倍. 由[2]可知,一般航迹关联和航迹融合算法的关键在于互协方差的递推运算. 经推导得到:在本融合系统中(特殊融合),[2]中一般航迹关联和航迹融合算法仍可推广应用,只是将互协方差递推运算中的上一拍互协方差  $p^{ij}(k-1|k-1)$  改为上一拍的协方差  $p(k-1|k-1)$  即可.

## 4 仿真结果及分析(Simulation result and analysis)

在 Cartesian 直角坐标系中,两个目标在同一平面内作交叉匀速直线运动,运动方程为

$$\begin{aligned} x_1(t) &= 10000 + 400t \\ y_1(t) &= 10000 + 200t \\ x_2(t) &= 10000 + 200t \\ y_2(t) &= -10000 + 400t \end{aligned} \quad (7)$$

由于观测平台相对于匀速运动目标作正弦运动时,被动式跟踪可观测<sup>[3]</sup>,因此设载有红外/雷达双传感器的跟踪站(即载机)在同一平面内按正弦曲线轨迹运动,运动方程为

$$\begin{aligned} x_0(t) &= 350t \\ y_0(t) &= 4000 \sin(\pi t / 1800) \end{aligned} \quad (8)$$

设雷达的距离量测误差  $\sigma_R = 50\text{m}$ , 方位角误差  $\sigma_{\beta_{RD}} = 1.2^\circ$ , 红外仅测方位角,误差  $\sigma_{\beta_{IR}} = 0.1^\circ$ , 杂波密度  $\lambda = 0.005/\text{km}^2$ , 目标探测概率  $PD = 0.9$ , 红外及雷达的波门概率  $PG = 0.99$ , 红外的波门半径为 6.5, 雷达的波门半径为 9.2. 融合跟踪方式为:

(1) 一般融合跟踪: 红外、雷达同步工作航迹融合跟踪, 采样周期均为 1s.

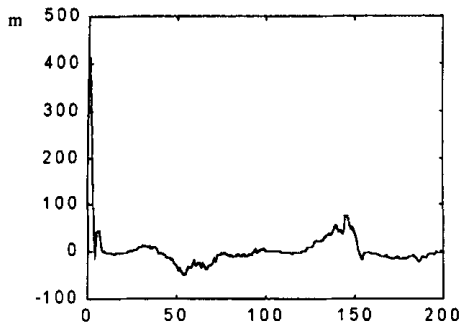
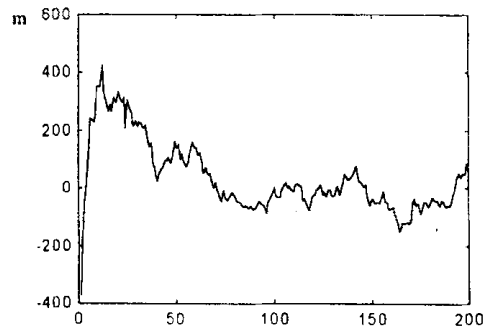
(2) 特殊融合跟踪: 红外为主/雷达为辅的航迹融合跟踪, 红外的采样周期均为 1s, 雷达的工作时刻由航迹质量检验模块的输出实时控制. 航迹质量检验统计量的滑窗长度  $N^l = 20$  拍, 置信区间半径为 3.

表 1 给出了目标 1 两种融合跟踪 100 次 Monte Carlo 仿真结果; 图 3 及图 4 分别给出了目标 1 两种融合跟踪 X 方向的位置误差的仿真曲线. 由仿真结果可知, 红外为主/雷达为辅的航迹融合跟踪与红外、雷达同步工作航迹融合跟踪相比, 稳态精度略低, 收敛速度稍慢. 但是, 它能大幅度减少雷达的开机时间, 从而大大提高系统的隐蔽性能, 因此, 在战场环境恶劣的情况下, 是一种优良的工程实现方案.

表 1 仿真结果

Tab. 1 Simulation result

融合方式	性能	稳定速度 (拍)	稳态均方根误差 RMSE				稳态均值误差 ME				雷达平均开机时间间隔(s)
			X 位置 (m)	X 速度 (m/s)	Y 位置 (m)	Y 速度 (m/s)	X 位置 (m)	X 速度 (m/s)	Y 位置 (m)	Y 速度 (m/s)	
一般融合跟踪		12	24.62	1.84	26.88	2.42	12.59	0.25	9.83	0.85	1
特殊融合跟踪		26	57.19	2.44	58.98	3.03	21.53	0.34	15.43	1.34	9.15

图3 一般融合跟踪  $x$  位置误差Fig. 3  $x$  position error of common fusion tracking图4 特殊融合跟踪  $x$  位置误差Fig. 4  $x$  position error of special fusion tracking

### 参 考 文 献 (References)

- 1 Bar-shalom Y. Multitarget-Multisensor Tracking: Applications and Advanced. Artech House. 1990
- 2 Bar-shalom Y. Multitarget-Multisensor Tracking: Principles and Techniques. YBS Publishing. 1995
- 3 潘 泉, 戴冠中, 张洪才. 被动式跟踪系统的非线性可观测分析. 信息与控制, 1997, (3)
- 4 Aidala V J. Kalman Filter Behavior in Bearing-Only Tracking Application. IEEE. Trans. on AES. 1979, 15(1)
- 5 周宏仁, 敬忠良, 王培德. 机动目标跟踪. 国防工业出版社, 1991

### 作者简介

程咏梅(1960- ), 女, 博士, 副教授. 研究领域为主被动式多目标跟踪, 数据融合, 信息及图象处理, 模式识别.

潘 泉(1961- ), 男, 博士, 教授. 研究领域为主被动式多目标跟踪, 数据融合, 图象处理, 智能信息处理, 智能控制.

张洪才(1938- ), 男, 教授. 研究领域为最优估计, 非线性系统理论, 主被动式多目标跟踪, 数据融合, 图象处理, 智能信息处理, 智能控制.

(上接第 184 页)

### 参 考 文 献 (References)

- 1 赵振宇等. 模糊理论和神经网络的基础与应用, 清华大学出版社, 1996
- 2 焦李成. 神经网络系统理论, 西安电子科技大学出版社, 1995
- 3 Kirkpatrick S, et al. Optimization by Simulated Annealing. Science, 1983, (220): 671~ 680
- 4 Harold H, Szu and Ralph L Hartley. Nonconvex Optimization by Fast Simulated Annealing. Proceedings of the IEEE, 1987, 75 (11): 1538~ 1540
- 5 赵玉清等. 加速全局优化-鲍威尔法和模拟退火法的组合. 电子学报, 1998, (9)

- 6 王卓鹏等. 一种改进的快速模拟退火组合优化法. 系统工程理论与实践, 1999, (2)

### 作者简介

田景文(1962- ), 男, 副教授, 博士. 从事控制理论、人工神经网络模式识别技术的教学和科研及应用软件研制开发工作.

高美娟(1965- ), 女, 硕士, 副教授. 现在大庆石油学院攻读博士学位. 从事地震资料处理解释、油藏描述及储层预测、人工神经网络模式识别技术的教学和科研及应用软件研制开发工作.