

# 主/被动雷达模糊自适应 IMM 融合跟踪算法

丁兴俊, 周德云

(西北工业大学 电子工程学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:**在主/被动雷达复合制导背景下,提出一种基于模糊自适应交互多模型(IMM)的分布式融合算法。该算法将交互多模型和模糊推理的优点相结合,通过模糊推理机制在线调节模型集中部分模型的参数,使这些模型对不同的目标机动模式有更强的自适应能力。避免了传统交互多模型算法的模型冲突问题,大大减少了计算量。数字仿真结果表明了算法的有效性。

**关键词:**主/被动雷达;数据融合;自适应交互多模型算法;模糊逻辑

**中图分类号:** TN953 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009 - 3516(2007)01 - 0037 - 04

电子战、信息战使得现在战争的环境越来越复杂,基于数据融合技术的多传感器跟踪系统已经成为解决复杂环境下目标跟踪的一条有效途径<sup>[1]</sup>。主/被动雷达双模复合制导作为一种重要的复合制导形式,已成功地应用于各类型导弹的末制导系统中<sup>[2]</sup>。

在主/被动雷达数据融合系统中,分布式融合算法由于具有:对系统通信带宽要求较低,融合中心计算量小,系统可靠性高等特点<sup>[3]</sup>,更适合工程应用。本文以主/被动雷达复合制导为背景,针对机动目标跟踪,提出一种模糊自适应 IMM 分布式融合算法。

## 1 模糊自适应 IMM 跟踪算法

对于机动目标跟踪,单模型算法在理论上存在着较大的缺陷,而多模型可以综合各个模型的优点,避免单个模型的缺陷对跟踪性能的影响,这类算法在提高机动目标跟踪性能方面具有很大的潜力。近年来,多模型算法得到了人们的广泛关注<sup>[4-6]</sup>,已经成为目标跟踪研究领域的发展方向。

### 1.1 模糊自适应机动目标跟踪算法

模糊目标跟踪算法,在没有目标状态噪声协方差信息的情况下,通过获取目标机动的动态信息,应用建立的模糊推理系统在线调整过程噪声协方差矩阵,从而完成对目标的机动检测与跟踪。原理见图1,算法的设计主要包括3部分。

#### 1) 归一化

对模糊目标跟踪算法的输入变量  $E'(k)$  和  $\Delta E'(k)$  是预估误差  $E(k)$  和误差变化率  $\Delta E(k)$  的归一化结果,以二维空间为例,各变量的具体定义如下:

$$E(k) = \sqrt{E_x^2(k) + E_y^2(k)}, \Delta E(k) = E(k) - E(k-1) \quad (1)$$

其中  $E_x(k) = x_0(k) - x_p(k)$ ,  $E_y(k) = y_0(k) - y_p(k)$ ,  $x_0(k)$ 、 $y_0(k)$  和  $x_p(k)$ 、 $y_p(k)$  分别为  $k$  时刻目标的观测值和预估值。为了设计通用的模糊跟踪算法,对  $E_x(k)$ 、 $E_y(k)$  和  $\Delta E_x(k)$ 、 $\Delta E_y(k)$  进行归一化处理得到  $E'_x(k)$ 、 $E'_y(k)$  和  $\Delta E'_x(k)$ 、 $\Delta E'_y(k)$ 。相应的定义模糊推理系统的归一化输入:

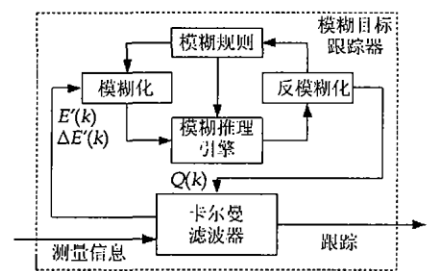


图1 模糊目标跟踪算法的结构图

收稿日期:2006-06-06

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(69931040)

作者简介:丁兴俊(1966-),男,江苏海安人,副教授,博士生,主要从事控制理论、组合导航等研究。

$$E'(k) = \sqrt{[E_x^2(k) + E_y^2(k)]/2} \quad \Delta E'(k) = \sqrt{[\Delta E_x^2(k) + \Delta E_y^2(k)]/2} \quad (2)$$

2) 模糊化

定义输入变量  $E'(k)$  和  $\Delta E'(k)$  的模糊集为 LP(正大), MP(正中), SP(正小), ZE(零)。隶属度函数采用梯形函数, 见图 2。输出变量为过程噪声  $Q(k)$ , 它是一个自调节的系统噪声协方差。假定  $Q(k)$  的范围为  $[0, 3]$ 。定义  $Q(k)$  的模糊集为 EP(正极大), VP(正非常大), LP(正大), MP(正中), SP(正小), ZE(零)。隶属度函数采用三角形函数, 见图 3。

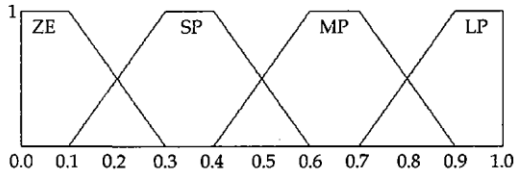


图 2  $E'(k)$  和  $\Delta E'(k)$  的隶属度函数

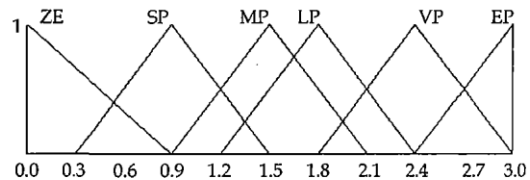


图 3  $Q(k)$  的隶属度函数

3) 模糊逻辑推理

依据定义的输入输出变量, 可以利用表 1 的模糊规则进行模糊推理。

反模糊化采用重心法, 经过反模糊化得到精确的值后, 再对观测值进行滤波处理就可得到目标的状态估计。

1.2 自适应交互 IMM 跟踪算法

交互多模型算法自产生以来, 衍生出多种算法, 更有朝智能方向发展的趋势, 但是基于工程化算法研究的考虑, IMM 算法最为成熟和完善, 本文将基于概率统计理论 IMM 滤波算法与上述的模糊自适应机动目标跟踪算法结合, 研究模型集合自适应交互多模型算法。

模型集合自适应交互式模型算法由 4 个步骤组成:

1) 输入数据交互

$$\mu_{ij}(k-1 | k-1) = \frac{1}{\bar{c}_j} p_{ij} \mu_j(k-1) \quad (3) \quad \bar{c}_j \sum_j p_{ij} \mu_j(k-1) \quad (4)$$

式中:  $\bar{c}_j$  为归一化常数;  $\mu_{ij}(k-1 | k-1)$  为各个输入数据交互的权重;  $p_{ij}$  为从模型  $i$  到模型  $j$  的转移概率(即马尔可夫转移概率), 是离线设计参数;  $\mu_i(k-1)$  为  $k-1$  时刻模型  $i$  与目标运动模式的匹配度。各个模型的输入数据将通过下面的表达式得到。

$$\left. \begin{aligned} \hat{X}_p(k-1 | k-1) &= \sum_i \hat{X}_i(k-1 | k-1) \mu_{ij}(k-1 | k-1) \\ P_p(k-1 | k-1) &= \sum_i \{ P_i(k-1 | k-1) + [\hat{X}_i(k-1 | k-1) - \hat{X}_p(k-1 | k-1)] \\ &\quad [\hat{X}_i(k-1 | k-1) - \hat{X}_p(k-1 | k-1)]^T \} \mu_{ij}(k-1 | k-1) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

2) 滤波

输入数据交互后通过各个子滤波器进行滤波。

3) 模型概率更新

$$\left. \begin{aligned} \Lambda_j(k) &= N(r_j(k), 0, S_j(k)) \\ \mu_i(k) &= \frac{1}{c} \Lambda_j(k) \sum_i p_{ij} \mu_i(k-1) = \frac{1}{c} \Lambda_j(k) \bar{c}_j \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中,  $N$  为高斯分布密度函数,  $\Lambda_j(k)$  为模型可能性指数,  $r_j(k)$  为滤波残差(即新息),  $S_j(k)$  为残差协方差。通过模型概率更新, 可以得到当前时刻输出数据交互的权值。

4) 输出数据交互

有了  $\mu_j(k)$ , 就可以进行  $k$  时刻的数据输出交互。

$$\left. \begin{aligned} \hat{X}(k|k) &= \sum_j \hat{X}_j(k|k) \mu_j(k) \\ p(k|k) &= \sum_j \{ P_j(k|k) + [\hat{X}_j(k|k)] - \hat{X}(k|k) [\hat{X}_j(k|k)] - \hat{X}(k|k) \}^T \mu_j \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

## 2 基于模糊自适应 IMM 的分布式融合算法

应用上述的模糊自适应多模型算法,对主/被动雷达系统的数据进行分布式融合。融合算法原理见图 4。

主/被动雷达的测量值首先进行滤波,得到局部最优估计  $X_1, X_2$ , 基于线性估计原理,融合中心对局部估计值进行如下最小方差融合:

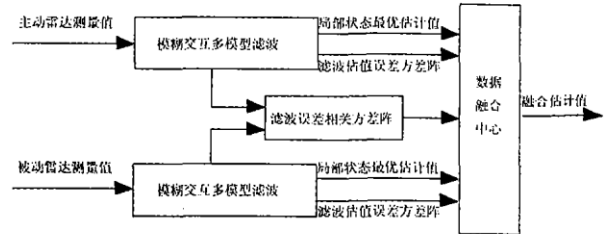


图 4 模糊自适应 IMM 分布式融合算法结构图

$$\hat{X} = \hat{X}_1 + (P_1 - P_{12})(P_1 + P_2 - P_{21} - P_{12})^{-1}(\hat{X}_2 - \hat{X}_1) \quad (8)$$

式中:  $P_{12}, P_{21}$  为两传感器的相关估计方差,  $P_{12} = P_{21}^T$ 。计算公式如下:

$$\left. \begin{aligned} P_{12}(k|k) &= [I - K_1(k)H_1(k)]P_{12}(k|k-1)[I - K_2(k)H_2(k)]^T \\ P_{12}(k|k-1) &= A(k-1)P_{12}(k-1|k-1)A^T(k-1) + B(k-1)Q(k-1)B^T(k-1) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

## 3 仿真分析

根据上述的融合方案进行数字仿真分析。仿真参数设置如下:假定主动雷达采样周期为 0.1 s,测距噪声均方差为 20 m,被动雷达采样周期为 0.05 s。假设前 20 s 传感器未受到干扰,主动雷达测角噪声均方差为 0.001 rad,被动雷达测角噪声均方差为 0.01 rad,20 s 后传感器受到干扰,主动雷达测角均方差变为 0.01 rad,被动雷达变为 0.002 rad。假设目标在三维空间内运动,起始位置为 [25 000, 10 000, 600],运动速度为 500 m/s,前 20 s 内目标做匀速直线飞行,20 s 后目标以法向 7 g 的加速度在 X-Y 平面内做圆周运动,至 50 s 飞行结束。图 5 为主被动雷达 X 轴位置误差(虚线为被动雷达滤波结果,实线为主动雷达滤波结果),图 6 为融合后 X 轴位置误差。

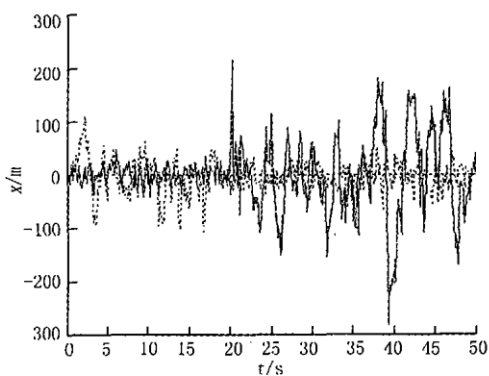


图 5 融合前 X 轴位置误差

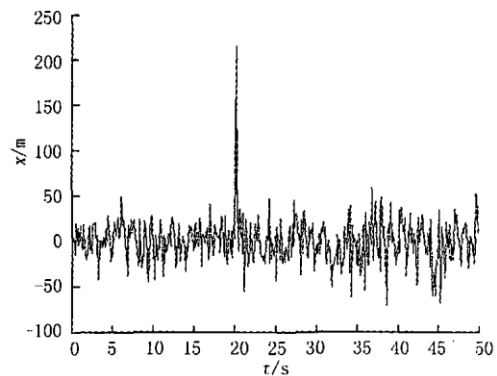


图 6 融合后 X 轴位置误差

由以上仿真曲线可以明显地看出,融合后的状态估计精度偏向于可靠性高的传感器精度,使融合后的数据更接近目标运动的真实数据,达到了数据融合的目的,并且取得了很好的效果。

## 4 结论

本文针对主/被动雷达的机动目标跟踪问题,提出了模糊自适应交互多模型分布式融合算法。该算法不

需要系统状态噪声协方差的先验信息,只需给定一个初始值并通过模糊推理系统自适应在线调整某些子滤波器的状态噪声协方差的值。通过以上算法可以用较少的模型很好的覆盖目标运动模式,大大减小了模型与运动模式不匹配造成的滤波误差,同时又避免了增加太多的计算量。与其它自适应方案相比,算法使用模糊推理系统的主要优点在于设计简单易于实现,能够充分应用专家经验,将模糊推理系统引入到多模型跟踪算法中,实现了用很少的运动模型较好的覆盖目标的运动模式,同时模糊推理系统对滤波实时性的影响不大。

以上分析表明,本文提出的融合算法,与基于传统的多模型跟踪融合算法相比,既确保了融合精度又提高了系统的实时性。

#### 参考文献:

- [1] 胡士强,敬忠良,胡洪涛,等.多传感器稳健融合跟踪算法[J].上海交通大学学报,2005,39(4):509-512.
- [2] 刘隆和.多模复合寻的制导技术[M].北京:国防工业出版社,1998.
- [3] 何友,王国宏,陆大瑜,等.多传感器信息融合及应用[M].北京:北京电子工业出版社,2000.
- [4] Johnston L A, Vikram Krishnamurthy. An Improvement to the Interacting Multiple Model (IMM) Algorithm [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001, 49: 2909-2923.
- [5] Jilkov V P, Angelova D S. Design and Comparison of Model-set Adaptive IMM Algorithms for Maneuvering Target Tracking [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35: 343-350.
- [6] 左东广,韩崇昭,郑林.机动目标的模糊多模型跟踪算法[J].西安交通大学学报,2002,12(36):1240-1244.

(编辑:姚树峰)

## A Decentralized Fusion Algorithm for Active / Passive Radar Based on Fuzzy Adaptive IMM Filter

DING Xing-jun, ZHOU De-yun

(College of Electronic Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China)

**Abstract:** A decentralized fusion algorithm based on fuzzy adaptive interacting multiple model (LMM) algorithm is proposed. Some parameters in the model-set are adjusted online by fuzzy inference system so that the model-set adaptive capability can be greatly improved in various target maneuvering patterns, and simultaneously the model conflicts caused by traditional IMM algorithm can be avoided and the computation load decreased. Simulation results show the effectiveness of the proposed algorithm.

**Key words:** active/passive radar; data fusion; adaptive IMM algorithm; fuzzy logic