

文章编号: 1000-6893(1999)03-0234-05

# 联合交互式多模型概率数据关联算法

潘 泉, 刘 刚, 戴冠中, 张洪才  
(西北工业大学 自动控制系, 陕西 西安 710072)

## COMBINED INTERACTING MULTIPLE MODELS PROBABILISTIC DATA ASSOCIATION ALGORITHM

PAN Quan, LIU Gang, DAIGuan-zhong, ZHANG Hong-cai  
(Department of Automatic Control, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**摘 要:** 通过对交互式多模型(MM)算法和概率数据关联(PDA)算法的研究, 指出 Bar-Shalom 和 Blom 等提出的 MM PDA 算法结构和理论上存在的问题, 根据全局最优的思想, 设计了一个最优波门, 从而得到全局最优的量测集合, 保证了系统的理论完整性和结构合理性。推导完成了新的联合 MM PDA 算法——C-MM PDA 算法。大量仿真计算验证了 C-MM PDA 算法在减少计算量的同时, 总体性能上较之原 MM PDA 算法有大幅度提高。

**关键词:** 交互式多模型; 概率数据关联; 多目标跟踪  
**中图分类号:** V 249 **文献标识码:** A

**Abstract:** Considering the four defects of construction and theory of MM PDA algorithm which is proposed by Y. Bar-Shalom and H. A. P. Blom, the authors work out a new Combined MM PDA algorithm—C-MM PDA algorithm. In C-MM PDA, a global optimal validating gate for every sub-filter is constructed instead of the different gates for every sub-filter in MM PDA algorithm. That means it has only one PDA F in the filter system. All the formulas are deduced and the diagram of the new algorithm is drawn. The work makes the MM PDA more satisfactory in construction and theory. Simulation results show that the new algorithm will decrease the computational burden and be of much better performance than MM PDA.

**Key words:** interacting multiple models algorithm; probabilistic data association algorithm; multiple targets tracking

传统的概率数据关联(PDA)算法<sup>[1,2]</sup>, 通常是以当前时刻以前的量测为条件, 来获取量测集合(落入波门内的回波集合)。将这种做法用于单纯的 Kalman 滤波器时, 所得到的量测集合是最优的(如下 2 个指标的综合最优: 落入波门内的杂波尽可能少; 真实回波的漏检概率尽可能小)。但是, 如果要将其用于其他一些比较复杂的算法, 按这种 PDA 概念就不一定能获得最优量测集合了。因此, 应将 PDA 的意义进行修正, 必须尽可能利用现有全系统信息来获取量测集合。只有这样, 才有可能使得量测集合真正成为最优。一些 PDA 算法的扩展或变形, 如 JPDA, DPDA 等<sup>[1~6]</sup>, 正是由于考虑了航迹方面的先验知识, 因而获取的量测集合的最优性才有所提高。但是现有各种 PDA 算法通常局限于利用量测本身所表现的特性进行修正。事实上, 将 PDA 应用于任何

一个系统时, 都需要考虑到系统的本身特性才行, 这样才可能真正获得所需要的最优量测集合。下面将讨论交互式多模型(MM)算法<sup>[7]</sup>与 PDA 算法<sup>[1]</sup>相结合时遇到的此类问题。

### 1 MM PDA 算法机理分析及 C-MM PDA 算法的提出

将 PDA 与 MM 算法相结合的通常的方法是直接对 MM 滤波器中的各个滤波器直接使用 PDA 算法, 仅在计算模型概率时似然函数的形式有所变化<sup>[1]</sup>(称为 MM PDA 算法<sup>[1]</sup>), 其算法结构可参见图 1(a)。

对原 MM PDA 算法的机理进行研究, 存在如下问题:

(1) 在回波集合的选取上, 原 MM PDA 算法虽然从各个子滤波器来看是最优的, 但是对于整个系统来说却不一定最优, 由于各子滤波器独立地进行一步预测, 故无法保证预测后的波门为全局最优, 所以最终各子滤波器仍无法得到全系

收稿日期: 1998-05-11; 修订日期: 1998-07-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(69772031)

统最优的量测集合;

(2) 在原 MM PDA 结构中, 各子滤波器采用不同的判别波门, 因而各子滤波器可能采用各自不同的回波集合, 但对于一个 MM 滤波算法来说, 由于各子滤波器所利用的回波不同, 由似然函数计算出的模型概率可能失效;

(3) 在原 MM PDA 算法结构中, 模型概率定义为  $u_i(k) = P[\Phi(k) | z^k]$ , 形式上看来没有什么不合理, 但由上面的讨论可知, 各子滤波器的量测集合可能互不相同, 因而使模型概率定义式中的  $z^k$  实际上应为  $z_i^k$ , 即各模型的模型概率的计算所基于的量测条件是不同的, 这种模型概率计算形式在很大程度上是不正确的;

(4) 在原 MM PDA 算法结构中, 由于对回波的关联是对各个子滤波器分别利用 PDA 算法进行的, 当回波数与模型数都较大时, 从结构上可看出在回波关联计算中计算量将与它们的乘积成

正比例增加, 这时, 运算量的耗费也是相当可观的。

由于上述原因, 原 MM PDA 算法结构容易产生失跟、误跟现象。在杂波环境中, 则常表现为失跟现象增加。而在航迹交叉中, 常表现为误跟现象增加。计算量也较大。

针对上述问题, 提出一种新的 MM PDA 结构, 即在 MM 结构中对各滤波器仅使用一个相同的波门录取回波, 而对各滤波器使用相同的回波关联与综合结果。从而在理论和实际两方面都保证所构造的波门为最优, 最终得到全系统最优的量测集合。这时 MM 与 PDA 相结合的算法结构需要进行重新设计, 见图 1(b)。比照原 MM PDA 结构可知, 其结构上的主要变化是对所有滤波器只进行了一次回波关联, 而且新增加了预测综合, 构成了联合交互式概率数据关联(C-MM-PDA)算法。

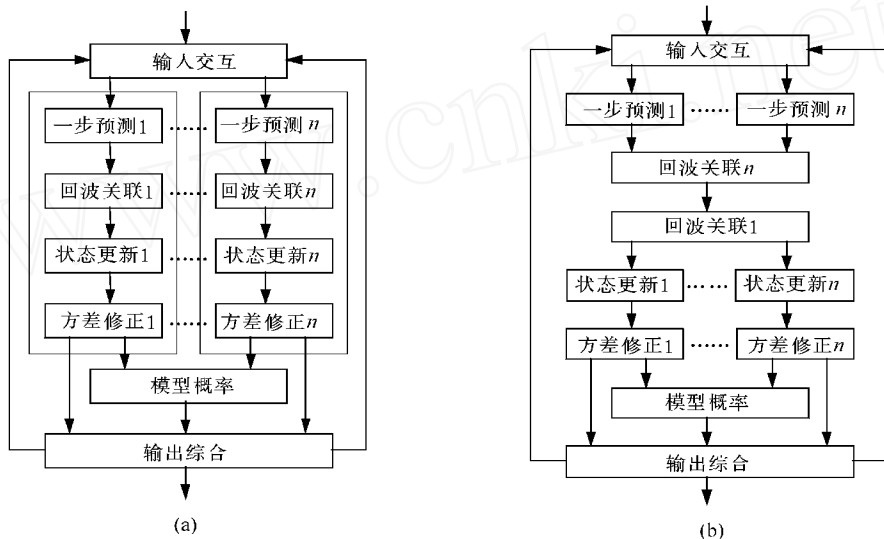


图 1 两种算法的结构示意图

(a) 原 MM PDA 结构; (b) C-MM PDA 结构(图中细线框表示其为 PDA 滤波器)

## 2 C-MM PDA 算法

在 MM 部分中有如下假设条件: 假定系统遵从一有限的模型集合, 并且各模型依照一已知转移概率的 Markov 链相互进行切换。用符号  $\Phi(k)$  表示事件“在  $k$  时刻第  $l$  个模型正确”,  $u_l(k)$  表示在  $k$  时刻第  $l$  个模型正确的概率, 并且用符号  $p_{ij}$  表示由模型  $i$  转移到模型  $j$  的先验转移概率。

对于 PDA 部分假设整个滤波器仅有一个波门, 其中心为量测的预测值, 大小由量测的预测协方差矩阵来决定, 另外假定对于一条航迹有且仅

有一个回波(可能是零回波——没有回波)正确。用符号  $z(k)$  表示  $k$  时刻量测的预测值  $S(k)$  表示  $k$  时刻量测的预测协方差矩阵,  $\theta(k)$  表示事件“在  $k$  时刻第  $l$  个回波为真实回波”,  $\beta_l(k)$  表示在  $k$  时刻第  $l$  个回波真实的概率。

假设模型数为  $M$ , 总回波数为  $N_k$ , 并设当前时刻为  $k$ , 已经得到  $k-1$  滤波器的各项滤波结果, 对于各滤波器  $k$  时刻的状态交互输入, 其形式与原算法相同<sup>[1]</sup>。假定已经得到  $N_k$  个回波, 要求在这些回波中挑出可能是正确的  $m_k$  个回波, 就需要有一个波门。前面已经提到, 可用量测的预测值及其协方差矩阵来构造一波门, 量测的预测值

定义为

$$\hat{z}(k) = \hat{z}(k|k-1) = E[z(k)|z^{k-1}] \quad (1)$$

其协方差矩阵为定义为

$$S(k) = S(k|k-1) = E\{[z(k) - \hat{z}(k)][z(k) - \hat{z}(k)]^T | z^{k-1}\} \quad (2)$$

经过推导可得

$$\hat{z}(k) = \sum_{l=1}^M u_l^p(k) \hat{z}_l(k) \quad (3)$$

$$S(k) = \sum_{l=1}^M u_l^p(k) \{S_l(k) + [\hat{z}_l(k) - \hat{z}(k)][\hat{z}_l(k) - \hat{z}(k)]^T\} \quad (4)$$

对任意回波  $z(k)$ , 令  $d^2(k) = [z(k) - \hat{z}(k)]^T S^{-1}(k) [z(k) - \hat{z}(k)]$ , 假设  $[z(k) - \hat{z}(k)]$  近似服从正态分布, 则  $d^2(k)$  将近似服从自由度为  $n_z$  的  $\chi^2$  分布(其中  $n_z$  为量测向量的维数)。因而可以利用假设检验的办法来决定是否接受  $z(k)$  在波门内。

如果已经得到  $m_k$  个落入波门内的回波。利用 PDAF 的结果知对于各个子滤波器应使用综合回波做为量测输入进行状态更新<sup>[1]</sup>, 状态更新方程与普通 Kalman 滤波方程相同。综合回波定义为

$$\begin{aligned} \bar{z}(k) &= E[z(k)] = \\ &= \sum_{l=0}^{m_k} E[z(k) | \theta(k)] \beta_l(k) = \\ &= \sum_{l=0}^{m_k} z_l(k) \beta_l(k) \end{aligned} \quad (5)$$

其中:  $z_0(k) = \hat{z}(k)$  为零回波, 而  $\beta_l(k) = P[\theta(k) | z^k]$  就是上面所说的  $k$  时刻第  $l$  个回波真实的概率——关联概率。因而要得到综合回波, 必须知道  $\beta_l(k)$ 。利用非参数模型 PDAF 的结果, 得到

$$\beta_0(k) = \frac{b(k)}{b(k) + \sum_{l=1}^{m_k} e_l(k)} \quad (6)$$

$$\beta_j(k) = \frac{e_j(k)}{b(k) + \sum_{l=1}^{m_k} e_l(k)} \quad j = 1, \dots, m_k \quad (7)$$

式中:  $e_j(k) = (P_G)^{-1} N(v_j(k); 0, S(k))$ ,  $j = 1, \dots, m_k$ ;  $b(k) = m_k(1 - P_D P_G) / [P_D P_G V(k)]$ 。其中  $P_D$  探测概率;  $P_G$  为目标的回波落入波门的概率;  $N(v_j(k); 0, S(k))$  表示参数为  $v_j(k) = z_j(k) - \hat{z}(k)$  (量测  $j$  的新息), 均值为 0, 方差  $S(k)$  的正态分布的概率密度函数; 而  $V(k)$  为波门体积, 且有  $V(k) = c_{n_z} |\mathcal{S}(k)|^{1/2}$ , 其中  $\mathcal{Y}$  由  $\chi^2$  分布表按  $P_G$  查

出, 而  $c_{n_z}$  为  $n_z$  维单位球体积。

利用综合回波对各子滤波器进行状态更新后, 由于各子滤波器利用的量测条件是综合后的量测, 将使原滤波后得到的状态估计的方差增大, 因而需要对其进行修正。可推得修正方程如下

$$P_i^c(k|k) = \beta_0(k) P_i(k|k-1) + [1 - \beta_0(k)] \cdot P_i^c(k|k) + \tilde{P}_i(k) \quad i = 1, \dots, M \quad (8)$$

其中:

$$\begin{aligned} P_i^c(k|k) &= [I - W_i(k) H_i(k)] P_i(k|k-1) \\ \tilde{P}_i(k) &= W_i(k) \{ \beta_0(k) [\tilde{z}_i(k) \tilde{z}_i^T(k) - \\ &\quad \bar{v}(k) \bar{v}^T(k)] + \sum_{l=1}^{m_k} \beta_l(k) v_l(k) v_l^T(k) - \\ &\quad \bar{v}(k) \bar{v}^T(k) \} W_i^T(k) \end{aligned}$$

各模型正确的概率  $u_l(k)$  定义为

$$u_l(k) = P[\Phi(k) | z^k] \quad (9)$$

利用贝叶斯公式按模型概率展开, 可得

$$u_l(k) = \frac{L_l(k) \prod_{m=1}^M u_m(k-1) p_{m_l}}{\sum_{l=1}^M L_l(k) \prod_{m=1}^M u_m(k-1) p_{m_l}} \quad (10)$$

其中:

$$L_l(k) = P[z(k) | \Phi(k), z^{k-1}] \quad (11)$$

对于  $L_l(k)$  的计算可以基于两种观点:

(1) 如果将算法中的 MM 算法做为一个独立的部分考虑, 即将回波关联算法看做是对量测的前端处理, 那么上式中的量测条件  $z^k$  实际上应为  $\bar{z}^k$ , 从而类似于 MMF 算法可得到

$$L_l(k) = \frac{\exp[-\frac{1}{2} \tilde{z}_i(k) S_i(k) \tilde{z}_i(k)]}{\sqrt{|2\pi S_i(k)|}} \quad (12a)$$

式中:  $\tilde{z}_i(k) = \bar{z}(k) - z_i(k)$ 。

(2) 如果对算法进行总体考虑, 则量测条件  $z^k$  应为  $z^k = \{z_0(k), z_1(k), \dots, z_{m_k}(k), z^{k-1}\}$ , 从而可得到类似于原 MM PDAF 算法的结果

$$L_l(k) = V_i^{-m_k}(k) (1 - P_D P_G) + \frac{V_i^{-1-m_k}(k) P_D \prod_{l=1}^{m_k} e_{il}(k)}{m_k \sqrt{|2\pi S_i(k)|}} \quad (12b)$$

其中:  $V_i(k)$  为按第  $i$  个子滤波器的量测预测值及其协方差计算出来的波门体积;  $e_{il}(k) = \exp\{-\frac{1}{2} [z_l(k) - \hat{z}(k)]^T S_i^{-1}(k) [z_l(k) - \hat{z}(k)]\}$ 。

最后进行输出交互

$$\hat{x}(k) = \sum_{l=1}^M u_l(k) \hat{x}_l(k|k) \quad (13)$$

$$P(k) = \prod_{i=1}^M u_i(k) \{P_i(k|k) + [\hat{x}_i(k|k) - \hat{x}(k)] [\hat{x}_i(k|k) - \hat{x}(k)]^T\} \quad (14)$$

### 3 C-MM PDA 算法的仿真研究

#### 3.1 仿真条件

采样周期  $T = 1s$ , 探测概率  $P_D = 0.9$ , 波门概率  $P_G = 0.99$ 。模型的选取采用了 CV 模型和 ACA<sup>[8]</sup> 机动模型, CV 模型系统噪声置为零。ACA 模型的最大加速度取为  $80m/s^2$ 。初始模型概率两模型均取为 0.5, 马尔可夫一步转移概率矩阵为  $P = \begin{bmatrix} 0.98 & 0.02 \\ 0.02 & 0.98 \end{bmatrix}$ 。各模型中的量测噪声强度取为  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 200m$ 。各点 Monte Carlo 仿真次数为 100。

#### 3.2 航迹形式

有 3 条交叉航迹:

- (1) 匀速 初始坐标  $(-9000, 1000, 0)m$ , 速度  $(600, 0, 0)m/s$
- (2) 匀速-匀加速-匀速 初始坐标  $(-6000, 1000, -1500)m$ , 初始速度  $(400, 0, 100)$

$m/s$ , 初始加速度  $(0, 0, 0)m/s^2$ , 第 20s 时加速度变为  $(80, 0, 20)m/s^2$ , 第 30s 时加速度再变为  $(0, 0, 0)m/s^2$ 。

- (3) 匀速-匀加速-匀速 初始坐标  $(250, 1000, 2098.214)m$ , 初始速度  $(100, 0, -17.857)m/s$ , 初始加速度  $(0, 0, 0)m/s^2$ , 第 20s 时加速度变为  $(60, 0, -10.714)m/s^2$ , 第 45s 时加速度再变为  $(0, 0, 0)m/s^2$ 。

#### 3.3 仿真结果

图 2 中标记 1, 2, 3 的实线 (C-MM PDA 算法) 和标记 a, b, c (原 MM PDA 算法) 的虚线分别表示 3 条航迹在实际量测噪声变化情况下所得到的结果。

2 种仿真结果总结如下: 在密集杂波情况下, C-MM PDA 较之原 MM PDA 大幅度减小了失跟率, 同时也使得系统跟踪精度大大提高; 在设计量测噪声和实际量测噪声不匹配情况下, 特别是实际量测噪声较小时, C-MM PDA 克服了原 MM PDA 算法的高失跟率情形, 并大大改善了跟踪性能; 对于机动情况下, C-MM PDA 算法的性能改善更为明显, 其各项性能指标均优于原 MM PDA 算法。

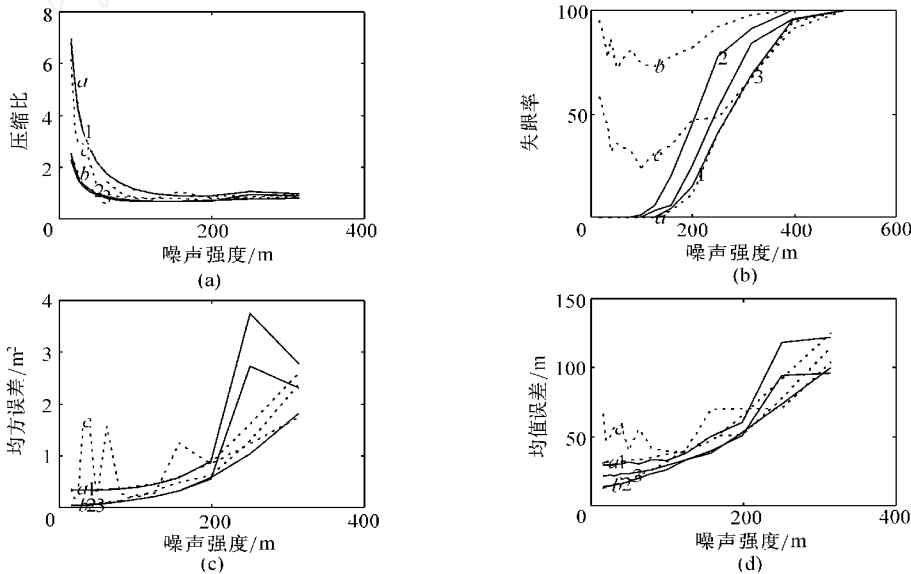


图 2 2 种算法对于 3 条交叉航迹的仿真结果比较

### 4 结 论

- (1) 第 1 次从机理上分析了 Bar-Shalom 和 Blom 等提出的 MM PDA 算法在结构和理论上存在的问题;
- (2) 根据全局最优的思想, 在结构中设计了

一个最优波门录取回波, 得到全局最优的量测集合, 保证了系统的理论完整性和结构合理性;

- (3) 重新设计了 MM 与 PDA 相结合的算法结构, 对所有滤波器只进行一次回波关联, 并增加了预测综合, 推导完成了联合交互式概率数据关联 (C-MM PDA) 算法;

(4) 进行了大量仿真计算,验证了C-MMP-DA算法在减少计算量的同时,总体性能上较之原MMPDA有大幅度提高,为MMPDA的有效应用奠定了坚实的理论基础。

### 参 考 文 献

- [1] Bar-Shalom Y, Chang K C, Blom H A P. Automatic track formation in clutter with a recursive algorithm [M]. MA, USA: Artech House NC, 1990. 25~42
- [2] ZHOU Hong-ren. Tracking of maneuvering targets [D]. University of Minnesota, 1984
- [3] 潘泉, 王陪德, 张洪才, 等. 修正概率数据关联算法[J]. 西北工业大学学报, 1993, 11(1): 211~217.
- [4] PAN Quan, ZHANG Jing-pin, ZHANG Hong-cai. General probability data association to maneuvering multi-target tracking [A]. Proc of the First Asia Control Conference (ASCC) [C]. Tokyo: July 1994, 13(3): 455~458
- [5] 潘泉, 向阳朝, 张洪才. 主导概率数据关联算法[J]. 航空学报, 1995, 16(3): 48~52
- [6] 潘泉, 张洪才, 向阳朝, 等. 组合式快速JPDA算法[J]. 航空学报, 1994, 15(5): 558~563
- [7] LIX R, Bar-Shalom Y. Performance, prediction of the interacting multiple model algorithm [J]. IEEE Trans on

AES, 1993, 29(3): 755~771.

- [8] 潘泉. 自适应目标跟踪算法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 1997.

作者简介:

潘泉, 1961年8月生, 博士, 西北工业大学自动控制系教授。主要研究方向有: 自适应估计理论与应用、小波理论及在信号处理中的应用、多目标多传感器数据融合、智能信息处理、C3I系统与仿真等。电话: (029) 8493062, e-mail: quanpan@nwpu.edu.cn。

刘刚, 1974年生, 现为西北工业大学博士研究生, 主要研究方向有: 自适应估计理论与应用、多目标多传感器数据融合、目标跟踪等。

张洪才, 1938年生, 西北工业大学自动控制系教授。主要研究方向有: 动态系统的建模、辨别与仿真、非线性估计理论、故障诊断与容错控制、多目标多传感器跟踪与数据融合、智能信息处理、C3I等。

## 推进系统气动热力学 '99 学术会议征文

经研究中国航空学会动力装置专业分会推进系统气动热力学专业委员会、江苏(苏鲁皖)航空航天学会动力装置专业委员会拟于1999年9月中旬联合召开'99年学术会议。

### 一、征文范围

(1) 航空航天发动机总体性能与结构研究的新成果新进展; (2) 发动机(或部件)设计计算方法与应用; 发动机(或部件)流场或温度场数值计算方法与应用; (3) 发动机控制技术; 发动机试验技术与测试技术; 发动机的特性监控、故障分析、安全使用和维修技术, 现役发动机的改造, 发动机设计与制造成本的估算; (4) 地面燃气轮机研制中的新成果新进展; 动力装置在军转民中的应用研究及民用动力与能源工程; (5) 发动机进排气流场的计算及其设计技术的研究; (6) 矢量喷管的设计技术及其对推进系统性能、结构、制造等方面的影响; (7) 进排气装置与发动机匹配技术的研究, 畸变试验技术及其评定方法; (8) 发动机总体气动热力学特性的研究, 新型热力循环的分析和计算; (9) 进排气装置新材料、推进系统隐身技术的研究; (10) 飞机发动机一体化设计技术, 下世纪战斗机的发动机方案; (11) 航天飞要的推进系统, 组合动力装置的设计问题。

### 二、征文要求

(1) 已在公开刊物或全国性学术会议上发表的论文不在征文之列; (2) 论文建议用word7.0编排, 每篇论文(含图表和参考文献)不超过6000字, 并附带200字左右摘要, 文字图表应清晰; (3) 报送的论文(附软盘)恕不退还, 请作者留好原文底稿, 并注明作者姓名、职务、详细通讯地址和联系电话以便联系。

### 三、会议时间及地点:

会议时间为1999年9月中旬, 会议地点另行通知。

### 四、截稿日期: 1999年6月30日

五、论文交寄地址: 南京航空航天大学动力工程系办公室收 来稿信封上注明“会议征文”字样。邮编: 210016, 电话 025-4892252。

(李铁柏)