

基于VS-IMM算法的A-SMGCS场面运动目标跟踪

宫淑丽 陶 诚 王帮峰 黄圣国

(南京航空航天大学民航学院, 南京, 210016)

摘要:为实现先进场面运动引导控制系统中场面监视雷达对运动目标的跟踪,研究了将变结构交互式多模型(Variable structure interacting multiple model, VS-IMM)算法应用到该系统中。首先,根据飞机的真实运动情况建立了飞机的匀速运动、匀加速运动和匀速转弯运动模型;然后,针对固定结构交互式多模型(Fixed structure interactive multiple model, FS-IMM)算法在目标跟踪方面的不足,结合机场地图,将VS-IMM算法应用到机场场面运动目标跟踪中;最后,基于扩展卡尔曼滤波将VS-IMM算法与FS-IMM算法进行仿真比较。结果表明:VS-IMM算法的跟踪精度及模型选择均优于FS-IMM算法,VS-IMM算法在场面跟踪方面具有更大的应用价值。

关键词:目标跟踪;交互式多模型算法;扩展卡尔曼滤波

中图分类号:V351 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2615(2012)01-0118-06

Maneuvering Target Tracking on Airport Surface for A-SMGCS Based on VS-IMM Algorithm

Gong Shuli, Tao Cheng, Wang Bangfeng, Huang Shengguo

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Aiming at tracking maneuvering target of surface movement radar (SMR) for the advanced surface movement guidance and control system (A-SMGCS), the variable structure interacting multiple model (VS-IMM) algorithm is used in the system. Firstly, according to the real movement of aircraft, a constant velocity motion model is established, as well as a constant acceleration motion model and a constant turn motion model. Then, considering the defects of the fixed structure interacting multiple model (FS-IMM) algorithm, the VS-IMM algorithm is applied to the airport surface movement target tracking by combining with the airport map. Finally, VS-IMM and FS-IMM algorithms are designed by extended Kalman filtering (EKF), and they are compared through computer simulation. Simulation results show that VS-IMM algorithm is more reliable than IMM algorithm on tracking accuracy. So VS-IMM algorithm has the greater value on surface maneuvering target tracking.

Key words: target tracking; interacting multiple model (IMM); extended Kalman filtering (EKF)

机场场面监视是保障机场上的航空器和车辆运行安全的基础技术。随着机场交通流量的增长、布局的日益复杂化,以及越来越多的在低能见度条件下进行的运行,仅靠管制员在监控中心来监视整个机场场面的方式逐渐显示出其落后性^[1]。航空器和车辆驾驶员希望能够在自己的航空器或车辆上

看到其所处的位置,及自身周围场面的运行状况,并希望及时得到报警信息。

针对上述问题,国际民航组织(ICAO)制定的先进场面运动引导控制系统(Advanced surface movement guidance and control system, A-SMGCS)应运而生^[2],从而展开了A-SMGCS的相

关理论和技术研究^[1-2]。

A-SMGCS系统实现的基本功能包括监视、路径选择、引导和控制。场面运动目标监视是其主要功能。目前我国首都机场、虹桥机场和浦东机场等几个大型国际枢纽机场安装有场面监视雷达(Surface movement radar, SMR),配合目视监视、话音通信等实现对机场场面活动区域的运动目标的监视与引导。由于SMR为一次雷达,主要依靠雷达对移动目标雷达回波的分析计算来探测目标的具体位置,因此对地形、障碍物、天气等外界因素有较高的要求,容易产生虚假信息,传统的空中交通管制跟踪算法不能消除这种虚假航迹^[3]。交互式多模型(Interacting multiple model, IMM)理论引入了多个目标运动模型,并按照一定的概率对每个模型的状态估计进行加权易于实现对运动目标的跟踪,在实际应用中,会产生良好的效果^[4]。但现有的大多数IMM算法在所有时刻均使用具有固定结构的模型集,即固定结构交互多模型算法(Fixed structure interactive multiple model, FS-IMM)。为了覆盖现实中所有可能的机动运动,FS-IMM中所选的模型集合要尽可能大,增加的模型数量不但会使计算量增大,而且会由于在当前时刻模型不一致而引起模型之间不必要的竞争,这会导致FS-IMM跟踪性能下降^[5-6];再者,固定的模型集并没有考虑目标运动的外在因素,如机场场面的地形条件等^[7]。FS-IMM的局限性已经引起了很大的关注。Li等人^[8]创立的变结构交互式多模型算法(Variable structure interacting multiple model, VS-IMM)使用时变的模型集,它的模型集和概率转移矩阵根据目标的运动情况和机场地图及其他因素等是可变的,在不同的条件下使用不同的模型集,能减少系统的计算量;再者能够保证所选模型与系统的运动相匹配,使MM估计器达到最优,提高跟踪的精度。理论上,VS-IMM能克服FS-IMM的缺点。因此,本文将结合运动目标的运动模型和机场地形,研究将VS-IMM算法应用于机场场面运动目标的雷达跟踪。系统框图如图1所示。

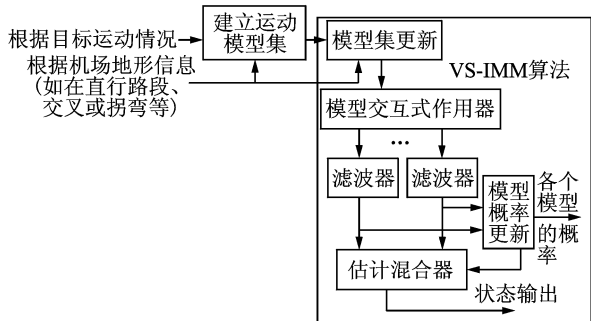


图1 基于VS-IMM算法运动目标跟踪的系统框图

1 机场地形信息的表示

机场场面地形信息能够全面反映出当前车辆和飞机在机场场面的位置、运行状态以及机场场面情况,让监控和司乘人员掌握最快速、最直观和最全面的信息。因此,电子地图是整个系统的重要组成部分。

机场场面分为两大部分:机场活动区和机坪。活动区包括跑道和滑行道,机坪主要用来卸载乘客和各种货物。本文只讨论地面车辆和飞机在活动区的运动情况。根据机场本身特有的地理环境,车辆和飞机有其严格的行经路线,而该路线被称为指定路径。指定路径由相互连接的道路组成,电子地图中的每条道路表示为折线,因此机场地图是由一系列由节点和宽度表示的线段组成的,第 i 段线段表示成 (p_i, p_{i+1}, w) ,其中 (p_i, p_{i+1}) 是第 i 段的两个端点, w 表示其宽度^[9],如图2所示。

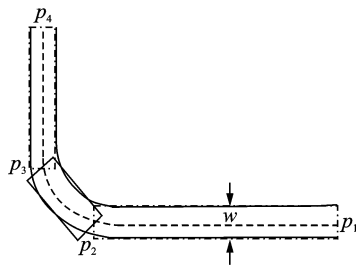


图2 机场道路表示方法

机场地形信息用来改善场面监视雷达提供的数据和目标的动态模型集。因此,这需要正确定位目标在机场地图上的位置,以决定目标的运动状态等。如目标在直线路段上行驶时,此时模型集只需包括此路段的路面信息;如果目标运行到交叉路口,而监控人员并不知道目标的运动方向时,就需要把所有与交叉口相连的道路的模型都加入到模型集中,直到目标驶入运行的道路后再把其他不相关的道路模型删除。因此,确定目标在机场地形上的位置至关重要。

2 目标动态模型和量测模型

VS-IMM算法是基于使用多个不同的运动模型分别匹配目标的不同运动状态,因此该算法的一个关键因素是目标运动模型的确定,它应尽可能地真实地反映目标的实际运动情况。

2.1 一般模型

目标的运动模型一般用动态模型和量测模型表示,目标的动态模型和量测模型表示为^[10]

$$\mathbf{X}(k) = \mathbf{F}(k-1)\mathbf{X}(k-1) + \mathbf{G}(k-1)\mathbf{W}(k-1)$$

$$\mathbf{Z}(k) = h\mathbf{X}(k) + \mathbf{V}(k) \quad (1)$$

式中: k 表示采样时刻; $\mathbf{X}(k) \in \mathbf{R}^n$ 为状态向量; \mathbf{F} 为 n 维系统转移矩阵; $\mathbf{Z}(k) \in \mathbf{R}^m$ 为量测向量; $\mathbf{W}(k) \sim N(0, Q)$ 和 $\mathbf{V}(k) \sim N(0, R)$ 分别为高斯过程噪声向量和量测噪声向量; \mathbf{G} 为系统噪声转移矩阵。

状态向量根据所选定模型的不同而不同, 观测向量包括距离和方位, 即 $\mathbf{Z}(k) = [r \ \theta]^t_k$, r 和 θ 的方差分别为 σ_r^2 和 σ_θ^2 。当 $\mathbf{X} = [x, y, v, h]^t$ 时

$$h\mathbf{X}(k) = [r \ \theta]^t = [\sqrt{x^2 + y^2} \ \arctan(y/x)]^t \quad (2)$$

2.2 目标的运动模型集

本文结合机场地形信息, 以着陆后的飞机从跑道到滑行道的运动为研究对象建立其模型集。

文中假定飞机在地面上的运动情况为: 着陆后在跑道上沿着跑道方向以 -2 m/s^2 的加速度作匀加速运动, 到达机场跑道与滑行道1的交叉口以 $1^\circ/\text{s}$ 的转弯速率匀速转弯运动到滑行道1上, 在滑行道1上作匀速运动, 然后运动到滑行道1与滑行道2的交叉口时, 再以 $4^\circ/\text{s}$ 的转弯速率匀速转弯到滑行道2上, 最终在滑行道2上保持匀速运动。所以其运动模型集为匀加速运动(Constant acceleration, CA)模型、匀速转弯运动(Constant turn, CT)模型、匀速运动(Constant velocity, CV)模型。在FS-IMM算法中, 只考虑以上3个模型, 而在VS-IMM中, 需要考虑机场地面的约束条件, 所以所建立的模型与FS-IMM中的模型不同。

在以下模型集的建立中, x, y 表示飞机的位置, v 表示飞机沿着道路方向(道路中心线方向)的速度, h 表示飞机的航向(即道路与水平面的夹角), a_t 为沿道路方向的加速度。

(1) CV 模型

设道路如图3所示, 即道路的中心轴线与水平方向(设为 X 轴方向)的夹角为 θ , 则CV运动模型选择状态变量为 $\mathbf{X} = [x, y, v, h]^t$, $a_t = 0$ 。假设其 \ddot{x} 和 \ddot{y} 作为随机噪声处理, 即 $\ddot{x}(t) = \ddot{y}(t) = \omega(t)$, $\omega(t)$ 为白噪声过程。

则CV模型的状态方程为

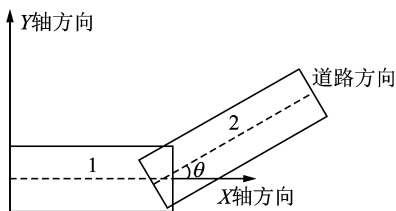


图3 道路方向示意图

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{F}_{CV}(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{G}_{CV}(k)\mathbf{W}(k) \quad (3)$$

$$\mathbf{F}_{CV}(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cos(h(k))T & 0 \\ 0 & 1 & \sin(h(k))T & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 T 为采样周期。

当飞机沿着道路行驶时, 在任何时刻都要满足 $h(k) = \pm\theta$ (正负号取决于车辆的运动方向)。

(2) CA 模型

选择状态变量 $\mathbf{X} = [x, y, v, a_t, h]^t$, 其中 $\dot{a}_t = 0$, 称为匀加速模型。假设其 \ddot{x} 和 \ddot{y} 作为随机噪声处理, 即 $\ddot{x}(t) = \ddot{y}(t) = \omega(t)$, $\omega(t)$ 为白噪声过程。则CA模型的状态方程为

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{F}_{CA}(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{W}(k) \quad (5)$$

$$\mathbf{F}_{CA}(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cos(h(k))T & \cos(h(k))/2T^2 & 0 \\ 0 & 1 & \sin(h(k))T & \sin(h(k))/2T^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 $h(k)$ 的条件同CV模型。

(3) CT 模型

当道路不是直线时(如图3中要由第1段运动到第2段), 飞机要转弯, 认为转弯时的速度不变, 选取的状态变量为 $\mathbf{X} = [x, y, v, h, \dot{h}]^t$, 其中 \dot{h} 表示转弯的角速度。其状态方程为

$$\mathbf{X}(k) = \mathbf{F}_{CT}(k-1)\mathbf{X}(k-1) + \mathbf{W}(k-1) \quad (7)$$

$$\mathbf{F}_{CT}(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cos(h(k) + \dot{h}(k) \cdot T)T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \sin(h(k) + \dot{h}(k) \cdot T)T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

转弯结束时, 飞机转过的角度就是 θ 。

3 变结构交互多模型算法(VS-IMM)

与FS-IMM算法相比, VS-IMM的模型集不同, 即模型的数量和类型是随时变化的。虽然在过去的二三十年里, FS-IMM算法在运动目标跟踪应用领域中, 取得了很大的进步, 但FS-IMM算法存在一些先天性的缺陷, 如所使用的任何模型在整个

跟踪过程中都有效,当模型增加时,将大大增加计算的复杂性,且使用更多的模型未必就能提高跟踪性能,实际上由于来自过多的模型间的不必要的竞争,反而会使算法性能下降,FS-IMM无法在这个问题上提供一个更好的折中,即计算量与跟踪性能之间存在矛盾。另外,FS-IMM算法不考虑运动目标的外部条件。VS-IMM算法是对FS-IMM算法的一种改进,它的模型集能自适应地变化。任意时刻,它对系统状态的估计依赖于前一时刻系统模式,其模型集是时变的^[11]。VS-IMM更适用于复杂的地面移动目标的跟踪,因此,本文研究将其应用于机场场面运动目标的跟踪。

设 S_k 为 k 时刻的IMM估计器的模型集合,即假设在 $(k-1, k]$ 时刻,目标总是按照 S_k 中的一个模型在运动,设 m_k 表示在这段时间内与目标运动相匹配的模型,若 $m_k^s (s \in S_k)$ 表示在 k 时刻匹配的模型是 s , μ_k^s 则表示模型 s 的概率,即

$$\mu_k^s = P\{m_k^s \in S_k | Z_k\} \quad (9)$$

VS-IMM的过程主要由模型集更新、模型交互、模型条件滤波、模型概率更新和估计融合5步组成^[12]。

(1) 模型集更新

k 时刻的模型集 S_k 是在基于 $k-1$ 时刻的目标状态估计、机场地形信息和 $k-1$ 时刻的模型集 S_{k-1} 等信息的基础上增加必要的、去除不必要的模型得到的。即

$$S_k = \{s \in S^a | S_{k-1}, R_k, Z_{k-1}\} = \{s \in S^a | S_{k-1}, R_k, \{\hat{x}_{k-1|k-1}^r, P_{k-1|k-1}^r, r \in S_{k-1}\}\} \quad (10)$$

式中: S^a 为目标所有可能的运动模型集合,即所有 S_k 的并集; R 为机场道路的信息,如直线段或转弯路径或交叉路口等。

(2) 模型交互

设 $k-1$ 和 k 时刻匹配模型分别为 r 和 s ,即 $r \in S_{k-1}, s \in S_k$,则从 $k-1$ 时刻的匹配模型 r 转换到 k 时刻的匹配模型 s 的转移概率与 S_{k-1} 和 S_k 有关,即

$$p_{rs}[S_{k-1}, S_k] = P\{m_k^s \in S_k | m_{k-1}^r \in S_{k-1}\} \quad (11)$$

模型 s 的预测概率为

$$\bar{c}^s = \sum_{r \in S_{k-1}} p_{rs}[S_{k-1}, S_k] \mu_{k-1}^r \quad (12)$$

模型的混合概率为

$$\mu_{k-1|k-1}^{rs} = P\{m_{k-1}^r | m_k^s, Z_{k-1}\} = \frac{p_{rs}[S_{k-1}, S_k] \mu_{k-1}^r}{\bar{c}^s} \quad (13)$$

$$\hat{x}_{k-1|k-1}^{0s} = \sum_{r \in S_{k-1}} \hat{x}_{k-1|k-1}^r \mu_{k-1|k-1}^{rs} \quad (14)$$

$$P_{k-1|k-1}^{0s} = \sum_{r \in S_{k-1}} \mu_{k-1|k-1}^{rs} [P_{k-1|k-1}^r + \{\hat{x}_{k-1|k-1}^r - \hat{x}_{k-1|k-1}^{0s}\} \{\hat{x}_{k-1|k-1}^r - \hat{x}_{k-1|k-1}^{0s}\}^T] \quad (15)$$

(3) 模型条件滤波

对 k 时刻以 $\hat{x}_{k-1|k-1}^{0s}, P_{k-1|k-1}^{0s}, R_k$ (k 时刻的道路信息)以及 Z_k 作为输入进行扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman filter, EKF)估计。

$$\hat{x}_{k|k-1}^s = F_{k-1}^s \hat{x}_{k-1|k-1}^{0s} \quad (16)$$

$$P_{k|k-1}^s = F_{k-1}^s P_{k-1|k-1}^{0s} (F_{k-1}^s)' + G_{k-1}^s Q_{k-1}^s (G_{k-1}^s)' \quad (17)$$

$$\hat{Z}_k^s = h_k^s(\hat{x}_{k|k-1}^s) \quad (18)$$

(4) 模型概率更新

模型概率更新是对于 $s \in S_k$,计算 s 模型概率,即

$$\mu_k^s = \frac{\Lambda_k^s \sum_{r \in S_{k-1}} p_{rs}[S_{k-1}, S_k] \mu_{k-1}^r}{\sum_{l \in S_k} \Lambda_k^l \sum_{r \in S_{k-1}} p_{rl}[S_{k-1}, S_k] \mu_{k-1}^r} = \frac{1}{c} \Lambda_k^s \bar{c}^s \quad (19)$$

$$c = \sum_{l \in S_k} \Lambda_k^l \bar{c}^l \quad (20)$$

式中 Λ_k^s 为似然函数。

(5) 估计融合

估计融合是给出 k 时刻的总体估计和总体估计误差协方差阵,分别为

$$\hat{x}_{k|k} = \sum_{s \in S_k} \hat{x}_{k|k}^s \mu_k^s \quad (21)$$

$$P_{k|k} = \sum_{s \in S_k} [P_{k|k}^s + (\hat{x}_{k|k}^s - \hat{x}_{k|k})(\hat{x}_{k|k}^s - \hat{x}_{k|k})'] \mu_k^s \quad (22)$$

VS-IMM估计器的步骤如图1中所示。

4 仿真分析

4.1 仿真初始条件设定及仿真结果

为验证系统性能,做如下仿真实验。设图4中的“o”线所示机场的跑道与滑行道的中心线。也代表飞机的仿真运动轨迹。即飞机着陆后从跑道运行到滑行道是按照如下的运动规律:飞机落地时初始位置为(200 m, 200 m),沿着跑道方向以初始速度为50 m/s, -2 m/s^2 的加速度运动,是CA模型;30 s后到达跑道与滑行道1的连接处,飞机以 $1^\circ/\text{s}$ 的转弯速率通过跑道与滑行道1的交叉处运动到滑行道1上,耗时20 s,是CT模型;从51 s开始在滑

行道1上匀速运动,是CV模型;80 s时到达滑行道1与滑行道2的交叉处,飞机又以 $4^\circ/\text{s}$ 的速度匀速转弯到滑行道2上,是CT模型;(91~120 s)在滑行道2上匀速运动,是CV模型。

在VS-IMM算法中需考虑机场地形信息,本文将机场地形划分为由5个椭圆表示的区域,如图4中椭圆所示。每个模型在一个椭圆区域内激活,如第1个模型(CA模型)在“runway”区域内是活动的,第2个模型(CT1模型)在“turning path-1”所示的椭圆区域内是活动的,第3个模型在“taxiway-1”区域内处于活动状态,第4个模型在“turning path-2”所示的椭圆区域内激活,第5个模型在“taxiway-2”的区域内有效。

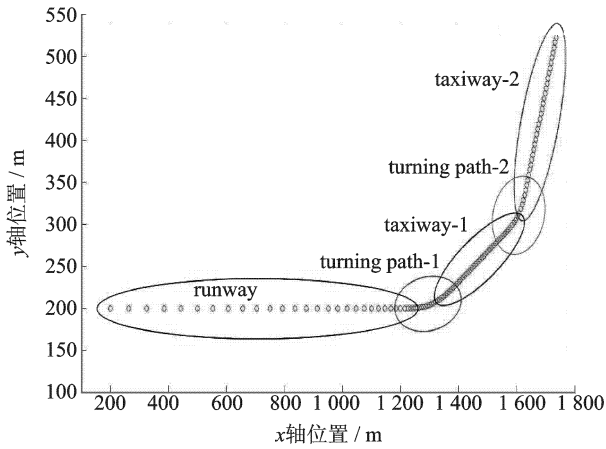


图4 飞机运动区域划分

在仿真中,考虑SMR的实际精度,测距误差设为17 m,方位误差为 0.2° 。雷达的采样周期为1 s。对FS-IMM和VS-IMM分别进行50次Monte Carlo仿真,并进行比较。FS-IMM和VS-IMM算法中的滤波器都采用EKF。在FS-IMM中只考虑3个模型,分别是CA,CT和CV模型。图5~8是两种方法经过Monte Carlo仿真后得到的各种曲线。

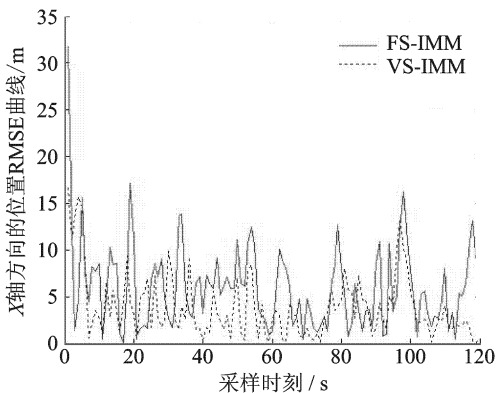


图5 目标X轴位置的RMSE曲线

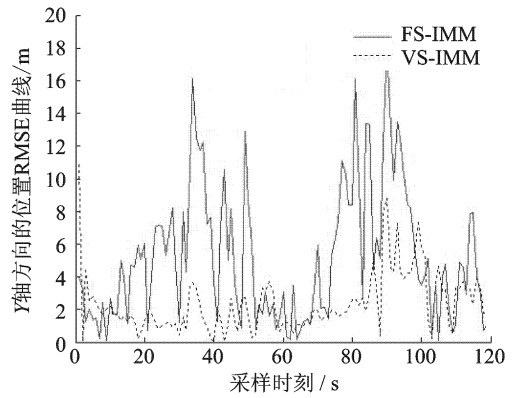


图6 目标Y轴位置的RMSE曲线

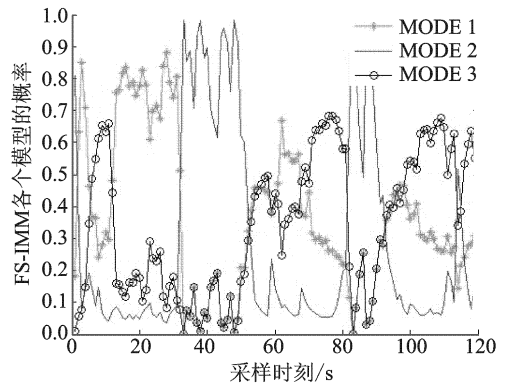


图7 FS-IMM算法中各个模型的概率

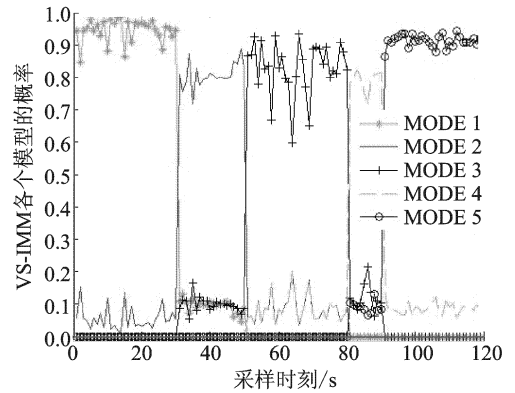


图8 VS-IMM算法中各个模型的概率

4.2 仿真结果分析

图5,6分别是X轴和Y轴目标位置的RMSE曲线,从图中可以看出,初始时FS-IMM和VS-IMM算法的误差都较大,但在整个跟踪过程中VS-IMM算法比FS-IMM算法的跟踪精度要高。如图5中,VS-IMM算法的RMSE峰值为17 m,FS-IMM为24 m;图6中VS-IMM算法的RMSE峰值为11 m,而且在其后整个跟踪过程都明显小于FS-IMM,FS-IMM算法的RMSE峰值为17 m。这说明,VS-IMM跟踪精度明显高于FS-IMM,而且

满足精度要求。再者,当进行模型转换时,如在30 s由CA模型转换为CT模型时,FS-IMM和VS-IMM的误差都会急剧增加,但FS-IMM算法的误差增加较大,VS-IMM算法能快速跟踪目标。

图7,8中各条曲线分别表示FS-IMM算法和VS-IMM算法中各个模型概率。从图中可明显看到,VS-IMM算法中各时刻模型的选择比FS-IMM灵敏度要高,所选择的模型最接近目标的真实运动状态。

5 结束语

本文根据机场地形信息和运动目标的运动模型,研究了将VS-IMM算法应用于机场场面监视雷达的目标跟踪,并将其于FS-IMM算法进行了仿真比较。仿真结果表明VS-IMM算法在跟踪精度及模型选择方面都优于FS-IMM算法,证明了VS-IMM算法的有效性。应用该算法,能有效改善机场场面监视能力,以提高场面安全。

参考文献:

[1] 吕小平. 空中交通管理文集[M]. 北京:航空工业出版社,2009.

[2] ICAO. Advanced surface movement guidance and control systems manual[R]. ICAO-9830, 2004.

[3] Farina A. Application of knowledge-based techniques to tracking function[EB/OL]. [2010-09-18]. <http://www.rto.nato.int>.

[4] Blom H, Bar-shalom Y. The interacting multiple algorithm for systems with Markovian switching coefficients[J]. IEEE Transactions on Automatic Con-

trol, 1988,33(8):780-783.

- [5] 嵇成新,许江湖,张永胜,等.一种跟踪机动目标的变结构交互多模型滤波算法[J].系统工程与电子技术,2003,25(5):595-599.
- Ji Chengxin, Xu Jianghu, Zhang Yongsheng, et al. A variable-structure IMM filtering algorithm for tracking a maneuvering target [J]. Systems Engineering and Electronics, 2003,25(5):595-599.
- [6] Cai M, Zong C G. An improved IMM algorithm with variable structure[C]//Proc of the 2nd Conference on Environmental Science and Information Application Technology. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2010: 507-510.
- [7] Leonides T. Control and dynamic systems [M]. New York: Academic Press, 1996:213-287.
- [8] Li X R. Multiple-model estimation with variable structure: Some theoretical consideration[C]//Proc of the 33rd IEEE Conference on Decision and Control. New York, NY, USA: IEEE Press, 1994: 1199-1204.
- [9] Herrero J G, Besada Portas J A, Casar Corredera J R. Use of map information for tracking targets on airport surface[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003,39(2),675-693.
- [10] 周宏仁,敬忠良,王培德.运动目标跟踪[M].北京:国防工业出版社,1991.
- [11] Li X R, Bar-Shalom Y. Multiple-model estimation with variable structure [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1996, 41(4):478-493.
- [12] Kirubarajan T, Bar-shalom Y, Pattipati K R, et al. Ground target tracking with variable structure IMM estimator[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(1):26-46.