

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.02.008

引用格式:倪育德,刘萍,马宇申.基于 ADS-B 意图信息的航迹预测改进算法[J].电讯技术,2014,54(2):156-162. [NI Yu-de, LIU Ping, MA Yu-shen. An Improved Trajectory Prediction Algorithm Based on ADS-B Intent Information[J].Telecommunication Engineering,2014,54(2):156-162.]

基于 ADS-B 意图信息的航迹预测改进算法*

倪育德,刘萍**,马宇申

(中国民航大学 天津市智能信号与图像处理重点实验室,天津 300300)

摘要:在飞行冲突探测和恶劣天气情况下,单纯利用跟踪滤波算法无法准确判断目标飞机未来的飞行动态。为了有效提高航迹预测精度,针对广播式自动相关监视(ADS-B)信息中意图信息对航迹的影响,提出了一种基于 ADS-B 意图信息的航迹预测改进算法。该改进算法先通过残差均值交互式多模型(RMIMM)算法,推算出目标飞机的飞行状态参数和飞机运动模式,再结合天气状况、飞行计划和空中交通管制规章进行意图估计,最后通过飞行状态参数、飞机运动模式以及意图信息共同预测目标飞机的航迹。运用蒙特卡洛方法进行仿真,结果表明,与现有算法相比,该改进算法不仅能提供更加精确的航迹预测,而且降低了意图推断的时间延迟。

关键词:广播式自动相关监视(ADS-B);意图信息;航迹预测;残差均值交互式多模型(RMIMM)

中图分类号:V328.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)02-0156-07

An Improved Trajectory Prediction Algorithm Based on ADS-B Intent Information

NI Yu-de, LIU Ping, MA Yu-shen

(Tianjin Key Lab for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract:For the flight conflict detection and vile weather, the future flight dynamic of the target aircraft can not be accurately judged if tracking filtering algorithm is only used. In order to enhance effectively the trajectory prediction accuracy, an improved trajectory prediction algorithm is proposed based on Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) intent information which has the effect on aircraft trajectory. For this improved algorithm, the flight state parameters and aircraft movement modes for the target aircraft are first estimated by Residual-Mean Interacting Multiple Model (RMIMM) algorithm, and then the target aircraft intent is estimated by the combination of the weather, flight plan, air traffic control regulations, as well as the flight state parameters and aircraft movement modes derived from RMIMM algorithm, and finally the target aircraft trajectory is predicted by the joint use of flight state parameters, aircraft movement modes and intent information. The Monte Carlo simulation is carried out, and the results show that not only can the more accurate trajectory prediction be achieved, but also intent inference time delay is reduced for this improved algorithm, compared with the existing algorithms.

Key words:automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B); intent information; trajectory prediction;residual-mean interacting multiple model (RMIMM)

1 引言

拥挤程度在不断增加。为保证民用航空的可持续发展,国际民航组织(ICAO)提出了“自由

随着国内外航空运输的快速发展,空中交通的

* 收稿日期:2013-11-06;修回日期:2014-01-21 Received date:2013-11-06;Revised date:2014-01-21

基金项目:天津市智能信号与图像处理重点实验室开放基金项目(TJKLASP-2012-4);中央高校基本科研业务费专项基金项目(ZXH2011C013)

Foundation Item:Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing Open Funds(TJKLASP-2012-4);An The Fundamental Research Funds for the Central Universities(ZXH2011C013)

** 通讯作者:pliu1989@sina.com Corresponding author:pliu1989@sina.com

飞行(free flight)”的全新理念^[1],而广播式自动相关监视(ADS-B)是实现该理念的重要监视技术。“自由飞行”中,飞行员可根据自身情况以及意图信息自主决定飞行航线,但是航线选择的任意性极大增加了飞行冲突的可能,为此要有更加高效的冲突探测和解脱手段^[2],以保证“自由飞行”的顺利实现。航迹预测是辅助冲突探测和解脱的关键,其准确性直接影响到空中交通管制自动化系统的性能,目前国内外学者在这方面开展了许多研究。文献[3]和文献[4]利用建立飞行器模型的方法来进行飞行航迹的模拟,但需要大量的飞行器参数,且数据获取困难,会严重影响航迹预测的准确性;文献[5]和文献[6]采用了基于卡尔曼(Kalman)滤波等估计预测算法的无参数方法,该方法只是单纯利用跟踪滤波算法进行航迹预测,并没有考虑到意图信息对航迹的影响,并且常规的卡尔曼滤波、 α - β 和 α - β - γ 滤波都属于单模型跟踪滤波算法^[7],很难适应目标飞机运动的多样性和不确定性,缺乏提升预测性能的空间。

针对以上问题,本文充分利用 ADS-B 系统所提供的意图信息,在交互式多模型(IMM)算法的基础上加以改进,提出了一种将残差均值交互式多模型(RMIMM)算法与意图推断算法(IIA)相结合的航迹预测算法,以此来实现目标飞机航迹的精确预测。

2 算法原理

航迹预测改进算法框图如图 1 所示。

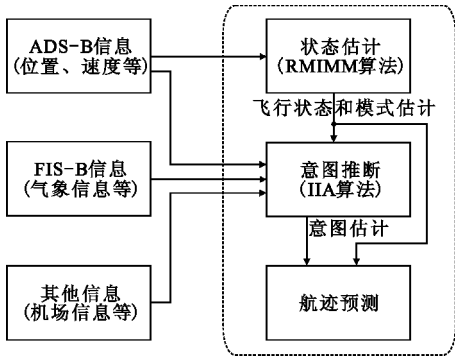


图 1 航迹预测改进算法框图

Fig.1 Block diagram of improved trajectory prediction algorithm

其中“状态估计”的作用是先建立准确的机动目标运动模型,然后利用 RMIMM 算法结合机载 ADS-B 系统的测量信息(位置、速度等),计算出目标飞机当前的飞行状态参数和飞机运动模式;“意图推断”的功能是利用 IIA 算法将状态估计后的结

果,结合 ADS-B 中广播式飞行情报服务(FIS-B)的气象信息、飞行计划信息和空中交通管制规章等推断出目标飞机的速度、航向角等意图信息;“航迹预测”则是结合前两部分的结果进行航迹推测。

2.1 状态估计

2.1.1 机动目标运动模型

常用的机动目标运动模型共有 6 种^[8],分别为匀速(CV)模型、匀加速(CA)模型、匀速率转弯(CT)模型、爬升下降(CH)模型、Singer 模型以及“当前”统计(CS)模型。本文只考虑飞机在水平面上的运动航迹,则目标飞机的运动模型采用 CV 模型和 CT 模型。

假设目标飞机的运动模式和对目标飞机的观测可用已知的数学模型表示,则线性离散时间下其状态方程和观测方程可表示为

$$\mathbf{X}(k+1)=\mathbf{A}_j\mathbf{X}(k)+\mathbf{B}_j\mathbf{w}_j(k),j\in\{\text{CV,CT}\}\tag{1}$$

$$\mathbf{Z}(k)=\mathbf{H}\mathbf{X}(k)+\mathbf{v}(k)\tag{2}$$

其中, $\mathbf{X}(k)$ 是 ADS-B 提供的 k 时刻目标飞机的状态矢量(位置、速度和加速度), $\mathbf{A}_j$ 为状态转移矩阵, $\mathbf{B}_j$ 为噪声转移矩阵, $\mathbf{w}_j(k)$ 是状态噪声; $\mathbf{Z}(k)$ 是 ADS-B 提供的 k 时刻目标飞机的观测矢量(位置、速度和加速度), $\mathbf{H}$ 为观测矩阵, $\mathbf{v}(k)$ 为观测噪声; $\mathbf{w}_j(k)$ 和 $\mathbf{v}(k)$ 为互不相关的高斯白噪声,协方差分别为 $\mathbf{Q}$ 和 $\mathbf{R}$ 。

若机动目标的连续状态矢量可表示为 $\mathbf{X}=[x,\dot{x},y,\dot{y}]^T$,其中 x 和 y 表示目标沿 x 轴和 y 轴方向的位置分量, $\dot{x}$ 和 $\dot{y}$ 表示目标沿 x 轴和 y 轴方向的速度分量,则 CV、CT 模型的系统参数分别为

$$\mathbf{A}_{\text{CV}}=\begin{bmatrix}1&T&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&T\\0&0&0&1\end{bmatrix},\mathbf{B}_{\text{CV}}=\begin{bmatrix}T^2/2&0\\T&0\\0&T^2/2\\0&T\end{bmatrix}\tag{3}$$

$$\mathbf{A}_{\text{CT}}=\begin{bmatrix}1&\frac{\sin(\omega T)}{\omega}&0&\frac{\cos(\omega T)-1}{\omega}\\0&\cos(\omega T)&0&-\sin(\omega T)\\0&\frac{1-\cos(\omega T)}{\omega}&1&\frac{\sin(\omega T)}{\omega}\\0&\sin(\omega T)&0&\cos(\omega T)\end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_{\text{CT}}=\begin{bmatrix}\frac{T^2}{2}&0\\T&0\\0&\frac{T^2}{2}\\0&T\end{bmatrix}\tag{4}$$

式中, T 为采样周期, 观测矩阵 $H_{CV} = H_{CT} = H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ 。

2.1.2 RMIMM 算法

RMIMM 算法是在已有的交互式多模型算法 (IMM)^[9] 的基础上改进得到的, 通过控制判断滤波残差均值 $E[r_j(k)|Z^{k-1}]$ 对 IMM 算法进行优化, 来增加正确模型和其他模型的区分度, 提高模型判断的准确度。RMIMM 算法包含输入交互运算、Kalman 滤波过程、模型概率更新以及输出交互运算。

(1) 输入交互运算

对 $k-1$ 时刻的状态进行输入交互运算, 得到混合概率为

$$\mu_{ij}(k-1/k-1) = \frac{p_{ij}\mu_i(k-1)}{c_j} \tag{5}$$

式中, $c_j = \sum_i p_{ij}\mu_i(k-1)$, p_{ij} 是马尔科夫模型转移概率, $u_i(k-1)$ 是指 $k-1$ 时刻模型 i 的概率。

由此可知重新初始化的状态和协方差按混合估计分别为

$$\hat{x}_{0j}(k-1/k-1) = \sum_i \hat{x}_i(k-1/k-1)\mu_{ij}(k-1/k-1) \tag{6}$$

$$\begin{aligned} P_{0j}(k-1/k-1) = & \sum_i \{ P_i(k-1/k-1) + \\ & [\hat{x}_i(k-1/k-1) - \hat{x}_{0j}(k-1/k-1)] \\ & [\hat{x}_i(k-1/k-1) - \hat{x}_{0j}(k-1/k-1)]^T \} \cdot \\ & \mu_{ij}(k-1/k-1) \end{aligned} \tag{7}$$

(2) Kalman 滤波预测

将式(6)和式(7)得到的滤波结果作为下一时刻与模型 j 相匹配的滤波器的输入变量, 然后每个滤波器按照各自的 Kalman 滤波算法进行状态滤波, 得到各自的状态估计及协方差阵为

$$\hat{x}_j(k/k) = \hat{x}_j(k/k-1) + K_j(k)r_j(k) \tag{8}$$

$$P_j(k/k) = P_j(k/k-1) - K_j(k)S_j(k/k-1)K_j^T(k) \tag{9}$$

其中, $K_j(k) = P_j(k/k-1)H^TS_{j-1}(k)$ 为 Kalman 滤波增益, $r_j(k) = Z_j(k) - H\hat{x}_j(k/k-1)$ 为滤波残差, $S_j(k) = HP_j(k/k-1)H^T + R$ 为滤波残差协方差阵。

(3) 模型概率更新

文献[9]给出了第 j 个模型中 k 时刻与其匹配的似然函数为

$$\Lambda_j^{IMM}(k) = N(r_j(k); 0, S_j(k)) \tag{10}$$

通过控制判断滤波残差均值 $E[r_j(k)|Z^{k-1}]$ 对 IMM 算法进行优化, 则重新构造的似然函数为

$$\Lambda_j^{RMIMM}(k) = \begin{cases} \frac{\|E[r_j(k)|Z^{k-1}]\|^{-1}\Lambda_j^{IMM}(k)}{\sum_j \|E[r_j(k)|Z^{k-1}]\|^{-1}\Lambda_j^{IMM}(k)}, & \text{if } E[r_j(k)|Z^{k-1}] \neq 0 \\ \Lambda_j^{IMM}(k), & \text{otherwise} \end{cases} \tag{11}$$

从式(11)可以看出, 当模型 j 不是正确模型时, 残差均值不为零; 当模型 j 是正确模型时, 则似然函数与 IMM 算法的似然函数相同, 且残差均值为零。由此可见, $\Lambda_j^{RMIMM}(k)$ 比 $\Lambda_j^{IMM}(k)$ 更容易判断模型之间的差别, 且 RMIMM 算法中系统处于模型 j 的概率为

$$\mu_j(k) = \frac{1}{c}\Lambda_j^{RMIMM}(k) \sum_i p_{ij}\mu_i(k-1) \tag{12}$$

由式(12)可知, k 时刻所处模式的估计, 即模型概率最大的模型为

$$\hat{m}(k/k) = \arg \max_j \mu_j(k) \tag{13}$$

(4) 输出交互运算

k 时刻目标状态的总体估计和总体估计误差协方差阵分别为

$$\hat{x}(k/k) = \sum_j \hat{x}_j(k/k)\mu_j(k) \tag{14}$$

$$\begin{aligned} P(k/k) = & \sum_j \{ P_j(k/k) + [\hat{x}_j(k/k) - \hat{x}(k/k)] \\ & [\hat{x}_j(k/k) - \hat{x}(k/k)]^T \} \mu_j(k) \end{aligned} \tag{15}$$

2.2 意图推断

IIA 算法^[10]通过判断目标飞机到各意图信息候选点即航迹改变点 (TCP) 的概率来判断目标飞机航向。该算法将飞行按运动模式分段, 先利用状态估计推断出目标飞机的运动模式, 然后根据目标飞机的飞行意图向量与目标飞机实际航向的接近度计算出概率最大的意图, 同时考虑飞行计划、空中交通管制规章对飞行的影响, 两者权值综合后的最大值即为该运动模式下的意图信息。意图信息候选点可按意图模式分类, 主要包括水平 (H) 意图模式、垂直 (V) 意图模式、速度 (S) 意图模式三大类, 本文只考虑水平意图模式。

2.2.1 飞行意图权值

设在水平意图模式中, 每一种飞行意图向量用 I 表示, 其单位向量为 e_I , 若目标飞机飞行意图的航向角为 φ_I , 实际的航向角为 φ_{ac} 。当 φ_I 越接近 φ_{ac} 时, 表明本机机载 ADS-B 接收到的飞行意图准确度越高。图 2 中 e_x 和 e_y 是目标飞机在 x 轴和 y 轴的单位向量, (x_{ac}, y_{ac}) 是目标飞机的实际位置坐标, e_φ 为

目标飞机真实航向方向上的单位向量, e_{tcp} 和 e_{tcp+1} 为目标飞机两个候选意图向量,由图可见 e_{tcp} 比 e_{tcp+1} 更接近飞机航向,即意图 I_{tcp} 比 I_{tcp+1} 的可能性更大,则可以通过求目标飞机意图向量和航向的夹角来计算该意图的概率值。

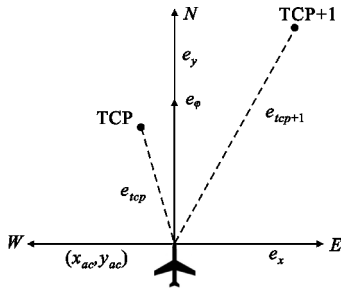


图 2 飞行意图推断图
Fig. 2 Aircraft intent inference

飞行意图的航向角 φ_I 和实际航向角 φ_{ac} 表示如下:

$$\begin{cases} \varphi_I(k) = \cos^{-1}(e_I(k) \cdot e_y) \\ \varphi_{ac}(k) = \cos^{-1}(e_\varphi(k) \cdot e_y) \end{cases} \quad (16)$$

式中,

$$e_I(k) = \frac{(x_{\omega p} - x_{ac})}{R_{\omega p}} e_x + \frac{(y_{\omega p} - y_{ac})}{R_{\omega p}} e_y, \\ e_\varphi(k) = \frac{v_x}{V_{ac}} e_x + \frac{v_y}{V_{ac}} e_y,$$

$V_{ac} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ 为目标飞机的地速, $(x_{\omega p}, y_{\omega p})$ 为目标飞机意图候选点的坐标, $R_{\omega p}$ 表示两个坐标点之间的距离,则意图 I 在 k 时刻的概率为

$$\lambda_I(k) = N(\varphi_I(k) - \varphi_{ac}(k); 0, \sigma^2) \quad (17)$$

其中, $N(\varphi_I(k) - \varphi_{ac}(k); 0, \sigma^2)$ 是服从均值为 0、方差为 σ^2 的正态分布。为了确保航向角在飞机航向 $\pm 3\sigma$ 边界范围内的有效意图的概率密度面积达到 99%, 设置参数 $\sigma = 5$ 。考虑到随着时间的推移会产生意图推断误差,引入记忆衰减因子 f 来降低历史数据所造成的影响,意图 I 在 k 时刻的概率改为

$$\begin{cases} \Lambda_I(k) = \frac{1}{G_k} \sum_{n=k_0}^k f^{k-n} \lambda_I(n) \\ G_k = \sum_{n=k_0}^k f^{k-n}; \quad G_{k_0} = 1 \end{cases} \quad (18)$$

则飞行意图权值为

$$k_1(I) = \begin{cases} \lambda_I(k) - \lambda_I(k-1), & \text{机动情况下} \\ \lambda_I(k), & \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

2.2.2 飞行计划和管制规章的权值

由于飞行必须在遵循飞行计划和管制规章的前

提下进行,因此对于其权值的计算有利于在众多数值相似的意图信息中再次滤掉不合理的意图信息。其权值定义为

$$k_2(I) = \begin{cases} N(\text{TTG}(\omega_p(I)); 0, (\sigma_{\text{reg}})^2) & \text{if } I \in \Pi_{\text{reg}} \\ N(\text{TTG}(\omega_p(I)); 0, (\sigma_{\text{fp}})^2) & \text{if } I \in \Pi_{\text{fp}} \end{cases} \quad (20)$$

式中, $\text{TTG}(\omega_p(I))$ 表示为飞行意图点的函数;由于飞行计划是静态的意图信息,在飞行过程中,飞行员更多的是遵循空中交通管制规章,飞行计划会不断被飞行意图和管制意图所修改,则 $k_2(I_{\text{reg}}) > k_2(I_{\text{fp}})$;潜在冲突探测所需最大时长为 900 s,可设 $\sigma_{\text{reg}} = 900$, $\sigma_{\text{fp}} = 17$ 。

综上所述,意图信息是由飞行意图权值、飞行计划和管制意图权值共同决定的,可以表示为

$$\hat{l}(k) = \arg\max I(k_1(I) \cdot k_2(I)) \quad (21)$$

2.3 航迹预测

航迹预测中需要输入的数据包括飞行状态参数 $\hat{X}(k)$ 、运动模型 $\hat{m}(k)$ 和意图信息 $\hat{l}(k)$ 。

假设目标飞机处于 CT 模型,飞行意图为飞向 TCP 点,如图 3 所示,单纯使用状态估计预测或 ADS-B 的意图信息预测都不能准确反映目标飞机的真实航迹,只有将航迹预测分两段计算才能达到理想的效果。第一段用状态估计算法计算出目标飞机在初始状态的状态估计值,并预测到 P 点时间结束,第二段从 P 点开始用意图推断算法推断出下一个意图点 TCP,则两段航迹合起来为总飞行航迹。

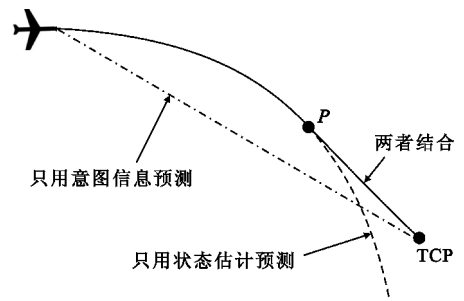


图 3 航迹预测比较图
Fig. 3 Comparison of trajectory prediction

3 仿真实验

模拟目标飞机在避开恶劣天气情况下的运动轨迹,其中观测到的目标飞机位置、速度和飞行计划等信息均来自于 ADS-B 报文。假设目标飞机为

BK2838,初始速度 $(v_x,v_y)=(300,300)$ km/h,初始坐标 $(x_0,y_0)=(1\,000,1\,000)$ m。目标飞机的真实航迹为:0~100 s飞机遵循飞行计划作匀速直线飞行,飞向 TCP-1 点;100~200 s 飞机为避开恶劣天气在管制员的协同作用下作匀速率转弯,转弯率 $\omega=-3^\circ/\text{s}$;200~300 s 飞机转弯结束后作匀速直线飞行,飞向下一个 TCP 点,然而该 TCP 点在雷雨区内,飞机为再次避开恶劣天气决定绕过该意图点作匀速率转弯,转弯率 $\omega=3^\circ/\text{s}$;350~500 s 飞机飞向 TCP+1 点,之后回到飞行计划轨迹。

假设 ADS-B 接收机采样周期 $T=1$ s,将上述过程做 500 次蒙特卡洛仿真,仿真结果如图 4~10 所示。图 4 给出了目标飞机的飞行计划航迹、观测航迹以及改进算法的预测结果;同时将本文改进算法和单纯利用 RMIMM 算法的 x 轴和 y 轴的位置和速度预测误差进行了比较,如图 5~8 所示;图 9 和图 10 则分别为单纯利用跟踪滤波算法和采用航迹预测改进算法对模型推断的结果。

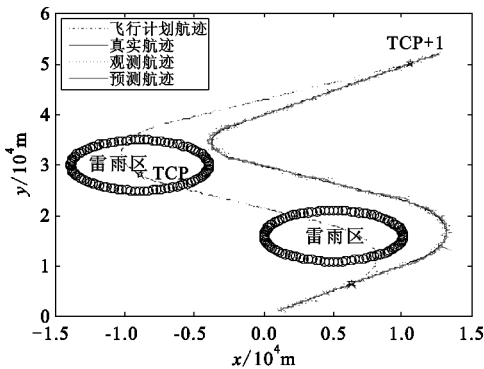


图 4 改进算法的目标飞机航迹预测

Fig. 4 Trajectory prediction of target aircraft by improved algorithm

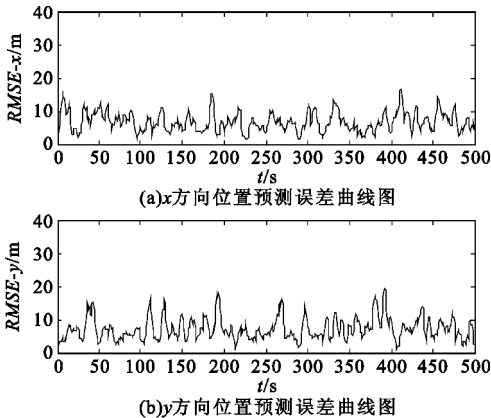


图 5 改进算法的位置预测误差

Fig. 5 Position prediction errors by improved algorithm

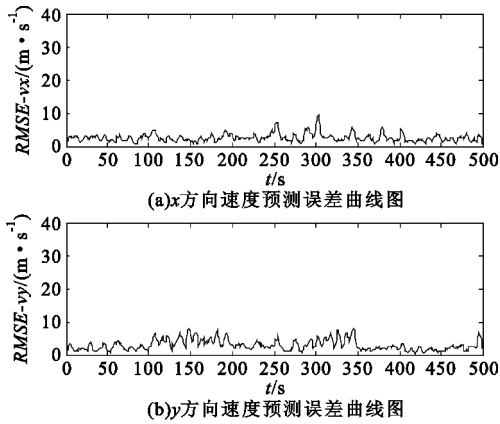


图 6 改进算法的速度预测误差

Fig. 6 Velocity prediction errors by improved algorithm

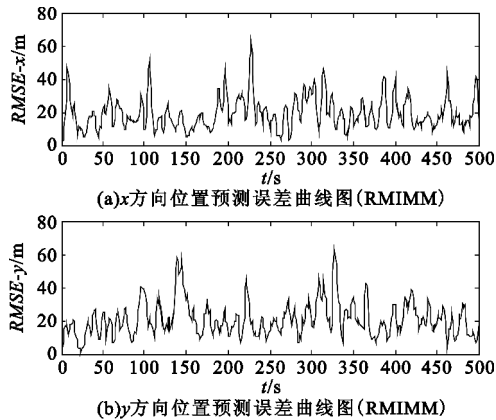


图 7 RMIMM 算法位置预测误差

Fig. 7 Position prediction errors by RMIMM algorithm

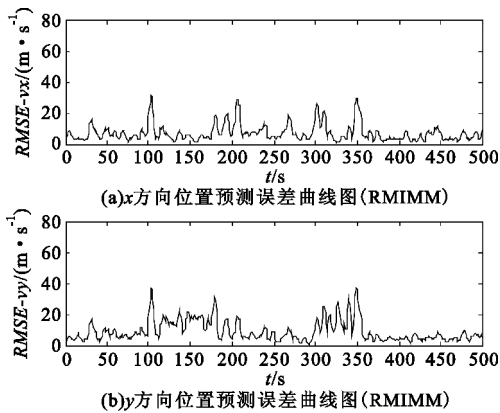


图 8 RMIMM 算法速度预测误差

Fig. 8 Velocity prediction errors by RMIMM algorithm

由图 4~8 的航迹预测结果及误差曲线图可以看出,采用改进算法的目标飞机的位置和速度均方根误差(RMSE)均小于单纯利用 RMIMM 算法的均方根误差,且误差曲线收敛性相对较好,满足 ADS-B 的精度要求,表明本航迹预测改进算法相比于单

纯利用 RMIMM 算法具有更高的估计精度。通过图 9 和图 10 的比较可以看到,本文采用的航迹预测改进算法对两种模型概率计算的区分度明显好于单纯利用 RMIMM 算法的结果,对目标飞机所处模型和意图的推断也相当准确,同时也降低了意图推断的时间延迟,尤其是在 $350\text{ s} < t < 360\text{ s}$ 时段飞机飞向 TCP+1 点时更加明显,验证了本航迹预测改进算法的有效性和优越性。

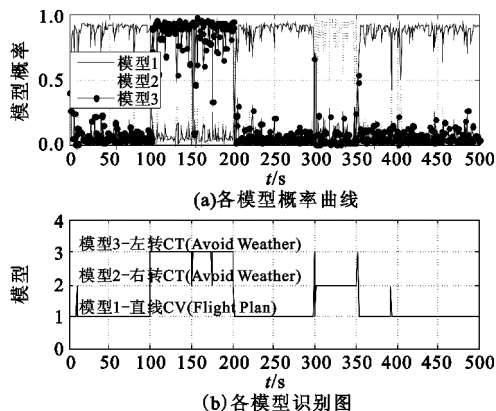


图 9 RMIMM 算法模型推断图

Fig. 9 Model inference by RMIMM algorithm

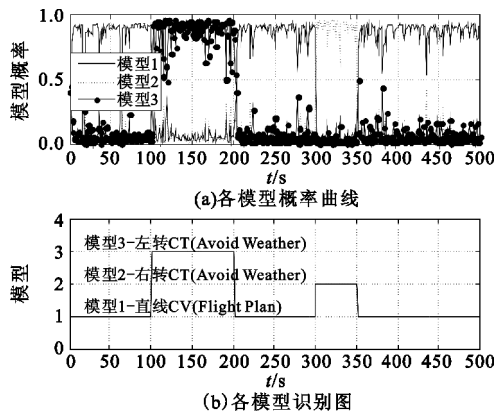


图 10 航迹预测改进算法模型推断图

Fig. 10 Model inference by improved algorithm

4 结束语

本文提出的航迹预测改进算法在不依赖飞行器性能参数的前提下,能充分利用 ADS-B 系统所提供的意图信息,将 RMIMM 算法与 IIA 算法相结合,来实现目标飞机航迹的精确预测。仿真实验结果表明,该算法显著改善了预测的准确性,降低了意图推断的时间延迟,并且计算量小,有利于飞行冲突的探测和解脱。但本航迹预测改进算法只在仿真环境下

验证了其性能的优越性,同时,针对复杂气象条件变化下的航迹预测也有待于更深层次的研究,以进一步提高航迹预测的准确性。

参考文献:

- [1] 王鲁杰. 空中交通安全责任向空中转移——下一代空中交通管理的一个重要理念[J]. 中国民用航空, 2007(6): 38-40.
WANG Lu-jie. Air Traffic Safety Responsibility to Air Transfer-An Important Concept in the Next Generation Air Traffic Management[J]. China Civil Aviation, 2007(6): 38-40. (in Chinese)
- [2] Inseok H, Seah C E. Intent-Based Probabilistic Conflict Detection for the Next-Generation Air Transportation System[J]. Proceedings of the IEEE, 2008, 96(12): 2040-2059.
- [3] 郭运韬,朱衍波,黄智刚. 民用飞机航迹预测关键技术研究[J]. 中国民航大学学报, 2007, 25(1): 20-24.
GUO Yun-tao, ZHU Yan-bo, HUANG Zhi-gang. Study on Key Trajectory Prediction Techniques of Civil Aviation Aircraft[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2007, 25(1): 20-24. (in Chinese)
- [4] 王超,郭九霞,沈志鹏. 基于基本飞行模型的 4D 航迹预测方法[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(2): 295-300.
WANG Chao, GUO Jiu-xia, SHEN Zhi-peng. Prediction of 4D Trajectory Based on Basic Flight Models[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(2): 295-300. (in Chinese)
- [5] Hartikainen J. Optimal Filtering with Kalman Filters and Smoothers-A Manual for Matlab Toolbox EKF/UKF[M]. [S.l.]: Department of Biomedical Engineering and Computational Science, 2011.
- [6] Chiou Y S. Reduced-complexity Scheme using Alpha-Beta Filtering for Location Tracking[J]. IET Communications, 2011, 5(13): 1806-1813.
- [7] 周宏仁,敬忠良,王培德. 机动目标跟踪[M]. 北京:国防工业出版社, 1990.
ZHOU Hong-ren, JING Zhong-liang, WANG Pei-de. maneuvering target tracking[M]. Beijing: National Defense Press, 1990. (in Chinese)
- [8] Li X R, Jilkov V P. A Survey of Maneuvering Target Tracking-Part I: Dynamic Models[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(4): 1333-1364.
- [9] Li X R, Jilkov V P. A Survey of Maneuvering Target Tracking-Part V: Multiple-Model Methods[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2005, 41(4): 1255-1321.
- [10] Krozel J, Andrisani D. Intent Inference and Strategic

- Path Prediction[C]//Proceedings of 2005 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. San Francisco, California: AIAA, 2005: 225-236.
- [11] 孟军, 马彦恒, 董健, 等. 基于改进“当前”统计模型的 ADS-B 目标跟踪方法[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(2): 516-519.
- MENG Jun, MA Yan-heng, DONG Jian, et al. A Target Tracking Method of ADS-B Based on Modified Current Statistic Model[J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(2): 516-519. (in Chinese)
- [12] Vela A, Clarke J P, Feron E, et al. The Relative Value of Trajectory Prediction and Conflict-resolution Algorithms [C]//Proceedings of 2011 IEEE Digital Avionics Systems Conference. Seattle, WA: IEEE, 2011: 1-11.
- [13] Zhang Chaozhu, Shao Shuai. Research on ADS-B Target Trajectory Tracking [C]//Proceedings of 2011 International Conference on Multimedia Technology (ICMT). Zurich, Switzerland: IEEE, 2011: 3619-3622.
- [14] Schuster W, Porretta M. High-performance Trajectory Prediction for Civil Aircraft [C]//Proceedings of 2010 IEEE Digital Avionics Systems Conference. Salt Lake City, USA: IEEE, 2010: 1-5.
- [15] Zhang Jun, Liu Wei, Zhu Yanbo. Study of ADS-B Data Evaluation[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(4): 461-466.

作者简介:



倪育德(1963—),男,江西鹰潭人,1989年毕业于北京航空航天大学获工学硕士学位,2000年于法国民航大学获 CNS/ATM 专业硕士学位,现为教授,主要研究方向为无线电导航与监视;

NI Yu-de was born in Yingtan, Jiangxi Province, in 1963. He received the M. S. degree from Beihang University and the M. S. degree of CNS/ATM from Civil Aviation University of France in 1989 and 2000, respectively. He is now a professor. His research direction is radio navigation and surveillance.

刘萍(1989—),女,江西萍乡人,硕士研究生,主要研究方向为无线电导航与监视。

LIU Ping was born in Pingxiang, Jiangxi Province, in 1989. She is now a graduate student. Her research direction is radio navigation and surveillance.

Email: pliu1989@sina.com