

1-8-2019

Dropouts Processing in ADS-B Real-time Monitoring Based on Hybrid Filtering

Xiaoyun Shen

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

Jinxing Shen

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

Siyuan Zhang

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

Weidong Jiao

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

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Dropouts Processing in ADS-B Real-time Monitoring Based on Hybrid Filtering

Abstract

Abstract: Due to the bad real-time performance of variable dimension Kalman filter in dealing with the leakage of ADS-B real-time monitoring, a position/speed hybrid filter method is proposed. The variable dimension Kalman filter is improved based on the characteristic that the position message and the velocity message of ADS-B message are sent at different time. *Two measurement equations for position and speed are designed, and different measurement equation is selected according to message category. The speed/position and navigation accuracy category in message is utilized to estimate the position/speed of present moment*, so as to effectively solve the problem of data dropouts. Experimental results show that compared with the variable dimension Kalman filter, the track time interval processed by the proposed method is closer to the information transmission cycle of one second and has less impact on the delay.

Keywords

ADS-B, dropouts, hybrid filtering, Kalman filter, real-time monitor

Recommended Citation

Shen Xiaoyun, Shen Jinxing, Zhang Siyuan, Jiao Weidong. Dropouts Processing in ADS-B Real-time Monitoring Based on Hybrid Filtering[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(9): 3457-3463.

基于混合滤波的 ADS-B 实时监视漏点处理

沈笑云, 申金星, 张思远, 焦卫东

(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: 针对变维卡尔曼滤波在 ADS-B 实时监视中的漏点实时处理效果欠佳的问题, 提出了一种位置/速度混合滤波方法。根据 ADS-B 报文位置和速度信息不同时下发的特点, 对变维卡尔曼滤波进行改进。设计了位置和速度两种量测方程, 根据报文的类别选取不同的量测方程, 利用报文中的速度(位置)和导航准确度类别对当前时刻的位置(速度)进行估计, 有效改善了航迹的漏点问题。算法仿真结果表明, 与变维卡尔曼滤波相比, 本方法处理后的航迹点时间间隔更接近 ADS-B 报文的下发周期, 对延时影响更小。

关键词: ADS-B; 漏点; 混合滤波; 卡尔曼滤波; 实时监视

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018)09-3457-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201809029

Dropouts Processing in ADS-B Real-time Monitoring Based on Hybrid Filtering

Shen Xiaoyun, Shen Jinxing, Zhang Siyuan, Jiao Weidong

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

Abstract: Due to the bad real-time performance of variable dimension Kalman filter in dealing with the leakage of ADS-B real-time monitoring, a position/speed hybrid filter method is proposed. The variable dimension Kalman filter is improved based on the characteristic that the position message and the velocity message of ADS-B message are sent at different time. *Two measurement equations for position and speed are designed, and different measurement equation is selected according to message category. The speed/position and navigation accuracy category in message is utilized to estimate the position/speed of present moment, so as to effectively solve the problem of data dropouts.* Experimental results show that compared with the variable dimension Kalman filter, the track time interval processed by the proposed method is closer to the information transmission cycle of one second and has less impact on the delay.

Keywords: ADS-B; dropouts; hybrid filtering; Kalman filter; real-time monitor

引言

广播式自动相关监视(Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, ADS-B)是一种集卫星导航

定位技术、地-空、空-地、空-空数据链通信技术于一体的新技术, 世界民航发达国家已先后开展了 ADS-B 系统设备的建设、部署和应用^[1]。ADS-B 系统利用 S 模式应答机在正常工作的时间内, 每隔一定时间将报文广播出去, 为附近空域的其他飞机和地面基站提供飞机的位置、速度等飞行状态相关信息。ADS-B 报文采用下行数据链传输, 报文中下行链路格式(Downlink Formate, DF)字段用于区分报文类型, 使用的传输格式为: DF=17、DF=18、



收稿日期: 2016-12-07 修回日期: 2017-03-02;
基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国民航局联合研究基金(U1533115);
作者简介: 沈笑云(1965-), 女, 江苏盐城, 硕士, 研究员, 研究方向为计算机三维成像与图像仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 3457 •

DF=19, 其中 DF=17 格式用于 S 模式应答机发射的 ADS-B 消息, DF=18 格式用于非 S 模式应答机发射的 ADS-B 消息, DF=19 格式用于军事应用^[2]。

在 ADS-B 数据中, 在限定时间内未收到的航迹点, 称为漏点^[3]。漏点率是在一段时间内航迹中漏点的数量占总航迹点的数量比例^[4]。与传统监视方法二次雷达相比, ADS-B 数据更新速率更快, 其中位置信息更新速率一般为 0.5~1 s/次, 速度信息一般为 1 s/次。但在实际应用中, 由于导航系统精度以及传播过程中各因素的干扰, 实际接收到的 ADS-B 数据的时间间隔很大部分大于 1 s, 有些大于 10 s、20 s 甚至更大, 因此, ADS-B 并不总能提供有保障不间断的位置信息, 这对飞机的实时监视有很大影响。漏点处理作为航迹处理的一部分, 目前对其的研究仍然很少。航迹处理的重要步骤是航迹滤波, 目前应用最广泛的方法为卡尔曼滤波。文献[5-6]提出利用卡尔曼滤波对 ADS-B 数据进行状态估计, 虽未提及漏点, 但预防漏点的本质就是进行航迹预测, 该方法对漏点处理提供了很好的启发; 文献[7]针对 CAT021 格式的 ADS-B 数据进行了漏点率分析, 但未对漏点做进一步操作; 文献[8]利用卡尔曼滤波对 ADS-B 数据的漏点进行航迹平滑, 但在实时监视系统中利用这种方法对漏点预测需设置大量定时器, 将造成较大的硬件资源开销, 从而降低监视实时性。

本文针对 DF=17 数据不同类型的报文单独下发的特点, 在变维卡尔曼滤波的基础上提出了一种位置/速度混合卡尔曼滤波的方法, 利用当前接收的速度(或位置)对当前时刻的位置(或速度)进行估计, 可以对 ADS-B 数据进行“纠错补漏”, 实现位置、速度信息的综合, 从而为民用飞机的实时监视提供较准确的数据源。

1 漏点处理

航迹滤波是指将目标的位置, 速度和加速度作为目标状态矢量, 通过动力学方程来描述目标状态的变化, 利用递推的计算方法, 对目标的位置、速

度和加速度等进行预测^[9], 从而更新航迹信息。由于卡尔曼滤波是一种线性均方误差准则下的时域滤波器^[10], 它不需要进行时频域的转换, 并适用于计算机处理^[11-12], 本文使用卡尔曼滤波算法进行滤波。

1.1 利用变维卡尔曼滤波的漏点处理

从本质上来说, 卡尔曼滤波算法是一个递推算法^[13], 它有两个核心方程:

状态方程

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{H}\mathbf{X}_k + \mathbf{W}_k \quad (1)$$

和测量方程

$$\mathbf{Z}_{k+1} = \mathbf{C}\mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \quad (2)$$

式中: \mathbf{X}_k 为 $k(k=0,1,\dots)$ 时刻的状态向量; \mathbf{Z}_k 为 k 时刻的观测向量; \mathbf{H} 为状态转移矩阵; \mathbf{C} 为量测矩阵; \mathbf{W}_k 和 \mathbf{V}_k 为 k 时刻的噪声序列, 其协方差矩阵分别为 \mathbf{Q}_k 和 \mathbf{R}_k 。

卡尔曼滤波包含两个过程: 预测过程和更新过程。预测过程主要利用状态方程(1)建立对当前状态的先验估计, 估计当前状态变量和误差协方差的值, 以便为下一个时间状态构造先验估计值; 更新过程利用测量方程(2)在预测过程的先验估计值及当前测量变量的基础上建立起对当前状态的后验估计, 得出滤波增益并对状态和状态协方差进行更新^[14]。

用于航迹滤波的变维卡尔曼滤波根据目标的运动状态选取不同运动模型实现滤波, 当目标做匀速运动时使用二阶常速(Constant Velocity, CV)模型, 当目标做加速运动时则使用三阶常加速(Constant Acceleration, CA)模型^[15], 分别如公式(3)~(4)所示。

$$\mathbf{X}(k) = \begin{bmatrix} \dot{x}(k) \\ \ddot{x}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x(k) \\ \dot{x}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} w(k) \quad (3)$$

$$\mathbf{X}(k) = \begin{bmatrix} \dot{x}(k) \\ \ddot{x}(k) \\ \dddot{x}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x(k) \\ \dot{x}(k) \\ \ddot{x}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} w(k) \quad (4)$$

式中: $\mathbf{X}(k)$ 代表 k 时刻的状态向量, 其中位置分量为 $x(k)$, 速度分量为 $\dot{x}(k)$, 加速度分量为 $\ddot{x}(k)$; 考虑的随机扰动 $w(t)$ 服从均值为零, 方差为 σ^2 的

高斯分布。

利用该滤波算法处理漏点的方法为等时间间隔插值^[8]: 利用定时器对 ADS-B 数据进行漏点检测, 若规定时间内没有接收到数据, 则利用变维卡尔曼滤波对飞机当前状态进行等时间间隔推算, 实现对漏点的插值, 当漏点时间大于系统设定的最大推算时间时, 系统认为这架飞机已不在监视区域, 停止对其进行漏点检测。若之后又重新接收到该飞机的数据, 系统将初始化卡尔曼滤波器重新对其进行滤波。但是该方法没有利用速度报, 目标在转弯情况下速度更新不及时, 会造成航向偏差。

1.2 利用位置/速度混合滤波的漏点处理

文章针对数据为 S 模式应答机发射的 ADS-B 消息, 即 DF=17 格式数据。在 DF=17 数据格式中, ADS-B 报文分为几种不同的消息类型, 包括位置、速度、航班号和飞行状况等 7 种类型。其中每一类消息都有各自的格式, 并且单独下发。本文提出的位置/速度混合滤波则根据 ADS-B 数据这一特性对 2.1 节提到的测量方程进行改进, 根据 ADS-B 报文类型提取相应信息, 若为位置报则提取经纬高和位置准确度类别(Navigation Accuracy Category for Position, NAC_p), 若为速度报则提取经纬高各方向速度和速度准确度类别(Navigation Accuracy Category for Velocity, NAC_v), 利用提取到的信息构造相应的观测向量和噪声序列, 然后判断当前运动状态选取不同模型进行卡尔曼滤波。具体流程见图 1。

其中位置量测方程和速度量测方程分别如公式(5)~(6)所示。

$$\mathbf{Z}_p(k) = \mathbf{C}_p(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{V}_p(k) \quad (5)$$

$$\mathbf{Z}_v(k) = \mathbf{C}_v\mathbf{X}(k) + \mathbf{V}_v(k) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{Z}_p(k)$ 为 k 时刻位置滤波的观测向量; $\mathbf{Z}_v(k)$ 为 k 时刻速度滤波的观测向量; $\mathbf{X}(k)$ 为 k 时刻状态向量, 当目标处于匀速时采用式(3), 处于加速状态时采用式(4)。根据报文类型的不同采用 ADS-B 报文中的位置信息和速度信息交替作为卡尔曼滤

波的观测向量, 当位置信息出现遗漏时, 可以利用接收到的速度信息对位置进行估计, 从而改善漏点问题, 且不需要额外设置定时器去检测漏点。另外, 由于引入了速度观测量, 可以提高卡尔曼滤波器对状态估计的精度。

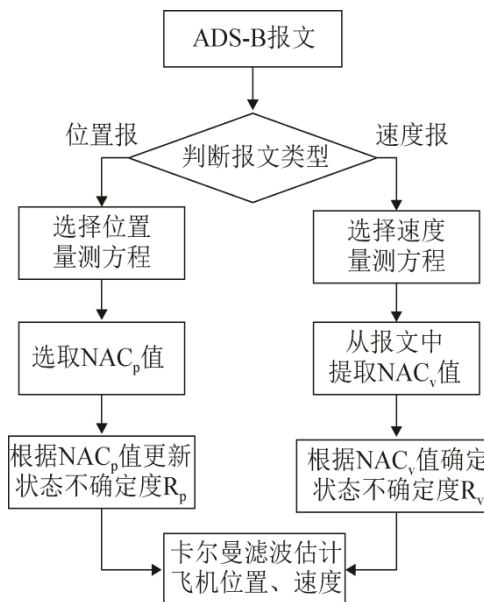


图 1 混合滤波流程图

Fig. 1 Flow chart of hybrid filter

另外, 为了提高卡尔曼滤波器对状态估计的精度, 在滤波过程中除了用到位置报中的经纬度和速度报中经纬方向的速度外, 还用到了两个性能指标: NAC_p 与 NAC_v , 实时对卡尔曼滤波器中的测量噪声 $\mathbf{V}(k)$ 的协方差矩阵 \mathbf{R} 进行修正更新。其中 NAC_p 表明当前广播的水平位置 95%准确度界限, NAC_v 表明当前广播的水平速度 95%准确度界限^[2]。即若 $NAC_p=11$, 水平位置不确定度(Estimated Position Uncertainty, EPU)<3m, 则代表以报告位置为中心, 半径为 3m 的圆周, 实际位置在圆内的概率为 95%^[16], NAC_v 的定义同理。 NAC_p 与 NAC_v 的取值决定了报文中位置与速度的误差分布, 而 $\mathbf{V}(k)$ 作为量测噪声向量也由 NAC_p 与 NAC_v 决定的误差构造得到。

综上所述, 本文算法实现具体步骤如下:

步骤 1 利用 $k-1$ 时刻状态计算 k 时刻先验状态

估计:

$$\hat{X}_k^- = H\hat{X}_{k-1}^- \quad (7)$$

步骤2 计算 k 时刻先验估计误差的协方差矩阵:

$$P_k^- = HP_{k-1}^- H^T + Q \quad (8)$$

步骤3 计算卡尔曼滤波增益:

$$K_k = P_k^- C^T (CP_k^- C^T + R)^{-1} \quad (9)$$

步骤4 根据当前报文构造相应观测向量和量

测矩阵, 计算 k 时刻后验状态估计:

$$\hat{X}_k = \hat{X}_k^- + K_k (Z_k - C\hat{X}_k^-) \quad (10)$$

步骤5 计算 k 时刻后验估计误差的协方差矩阵:

$$P_k = (I - K_k C) P_k^- \quad (11)$$

在式(7)~(11)中: Q 为系统噪声 W 的协方差矩阵; R 为测量噪声 $V(k)$ 的协方差矩阵; K_k 为 k 时刻卡尔曼增益; P_k 为 k 时刻均方估计误差矩阵, 主要为计算 X_k 提供卡尔曼增益, 但除了计算卡尔曼增益外, 还是滤波器估计性能好坏的主要表征。

2 仿真实验与结果分析

2.1 数据来源

为了验证本文所设计的混合滤波算法的性能, 建立了一套包含 ADS-B 数据接收、数据解析、航迹提取和卡尔曼滤波的系统测试平台, 具体流程如图 2 所示。采用 SBS-3 型号的 ADS-B 接收机, 测试数据为接收机接收到的天津机场附近航班的 1 090 MHz 的 S 模式 ADS-B 报文数据。通过对 DF=17 格式的 ADS-B 报文进行解析, 获取飞机的位置、速度、航班号等信息。



图 2 测试平台流程图
Fig. 2 Flow chart for test

2.2 算法改进的可行性分析

本文从接收到的 ADS-B 报文中选取了一天的数据, 将其中的位置报按照不同时间间隔进行统计, 得到如图 3 所示的分布情况, 并将 ADS-B 速

度报也引入了时间间隔的统计, 如图 4 所示。两图对比可看出, 加入速度报后时间间隔小于 1 s 的比例增加了约 20%。同时利用时间间隔的具体分布信息对漏点率进行计算, 单纯考虑位置报时漏点率为 53%, 而加入速度报后漏点率降为 33%。

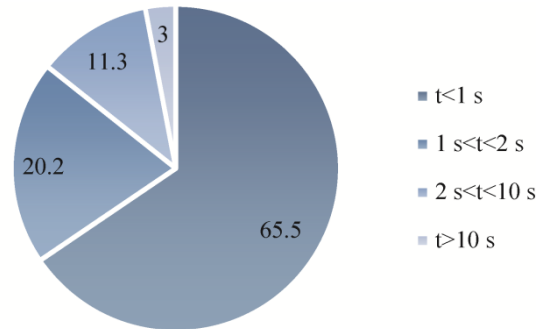


图 3 一天内位置报更新时间间隔统计
Fig. 3 Statistics on update interval of position report in one day

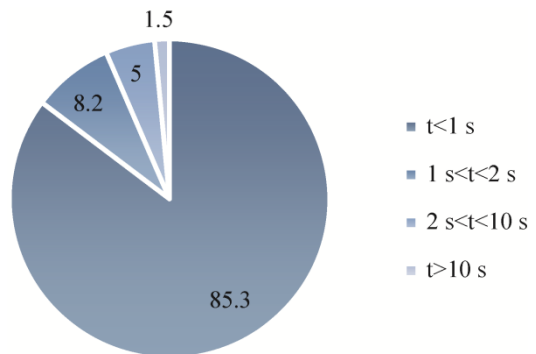


图 4 一天内位置/速度报更新时间间隔统计
Fig. 4 Statistics on update interval of position / velocity report in one day

表 1 中给出了两次统计的统计特性, 从中可以看出, 位置/速度报时间间隔的期望更接近 ADS-B 数据的更新时间, 且更加稳定。

表 1 统计特性对比

Tab.1 Comparison of statistical characteristics

Items	Expectation/s	Standard deviation/s
Time interval of position reports	2.241 8	14.817 8
Time interval of Position/velocity reports	1.175 8	10.563 1

因此, 利用位置/速度混合滤波进行漏点消除具有可行性。但相比变维卡尔曼滤波的等间隔插值^[6]方法, 混合滤波的递推步长是不均匀的, 它取决于位置报和速度报的时间间隔, 因此, 混合滤波虽然操作简单, 但若长时间接收不到报文则不能对当前时刻的状态进行预测。

2.3 算法仿真及对比

为了检验位置/速度混合卡尔曼滤波的对于漏点的修正效果, 本文选取了多段作为测试样本, 对位置/速度混合卡尔曼滤波进行了测试, 并与传统航迹滤波效果进行了对比。图 5 为 ICAO 地址为 780 872 的一段航迹, 从图中可以看出在经度为 117.43 和 117.47 附近存在漏点。

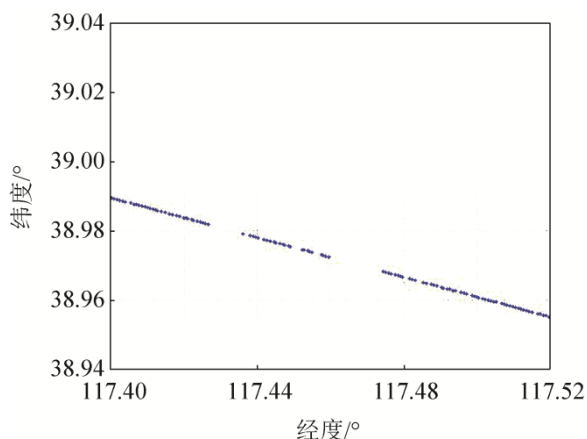


图 5 ADS-B 原始航迹中的漏点
Fig. 5 Dropouts in ADS-B original track

表 2 为对应经度为 117.47 附近的航迹信息, 很明显中间漏点长约 10 s。

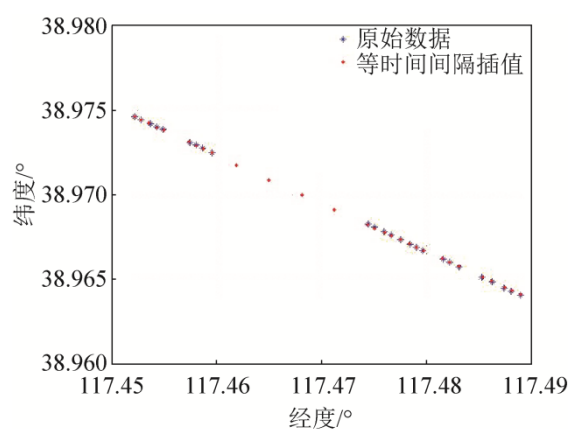
表 2 漏点处的航迹信息
Tab. 2 Track information at dropouts

Time	Longitude	Latitude
00:23:27.390 625	117.468 86	38.969 879
00:23:27.828 125	117.468 20	38.970 016
00:23:36.281 250	117.454 89	38.973 85
00:23:36.687 500	117.454 28	38.973 999
00:23:37.250 000	117.453 67	38.974 185

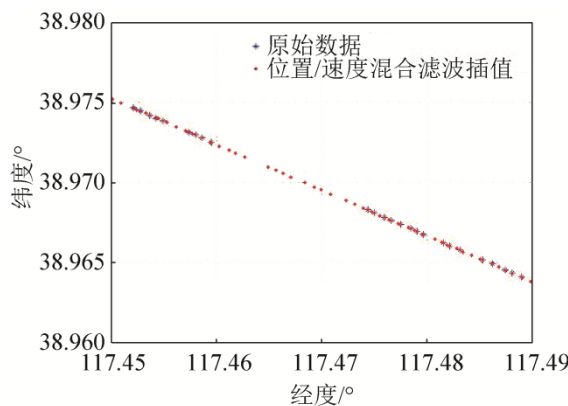
对等时间间隔插值和位置/速度混合卡尔曼滤

波插值进行仿真, 在相同滤波结构下对相同航迹进行漏点插值, 比较两种算法的插值效果。若要达到 ADS-B 航迹间隔与报文更新速率一致, 插值时间间隔应选取 1 s。但考虑利用 1 s 定时器来判定报文是否更新, 将消耗大量的计算机系统资源, 影响测试平台的运行性能。综合考虑以上因素, 这里的等时间间隔插值算法选取的时间间隔为 2 s。

图 6、图 7 分别为利用等间隔插值算法和位置/速度混合卡尔曼滤波算法对直线航迹和转弯航迹中的漏点进行插值的结果对比图。



(a) 等时间间隔插值



(b) 混合滤波

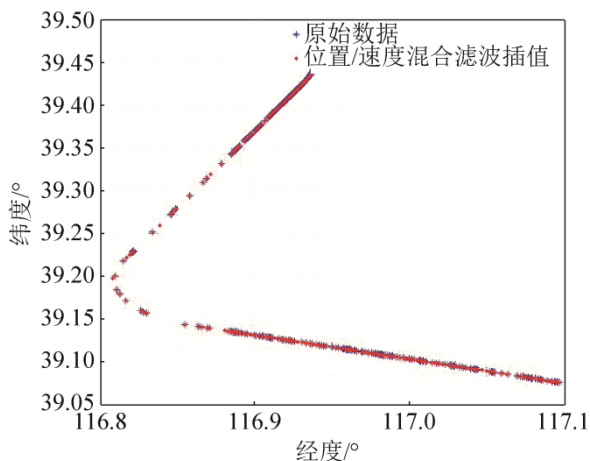
图 6 直线模型
Fig. 6 Linear model

从图 6 可以看出, 两种算法均能对直线航迹中的漏点进行较好的插值, 但位置/速度混合滤波的效果相比而言, 更加均匀、连续; 从图 7 可以看出, 在转弯航迹中等时间间隔插值算法由于无法及时对速度进行正确的估计从而无法完成正确的插值,

但混合滤波可以根据获得报文中的速度信息对速度进行准确的估计, 可以进行较好的插值。



(a) 等时间间隔差值



(b) 混合滤波

图7 转弯模型
Fig. 7 Turnmodel

表3为分别利用等间隔插值和位置/速度混合滤波对同一段航迹模拟实时处理的时间统计, 结果表明混合滤波的耗时小于等间隔插值, 对监视系统的实时性影响更小, 其中单架模拟时间缩短约100 s, 多架模拟时间缩短约107 s。且该时间段内共有52架飞机信息, 因此采用等间隔差值共需要设置52个定时器去不断检测漏点, 实现起来较为复杂。

由以上分析可得出, 直接利用接收到的ADS-B报文中的速度信息进行位置/速度混合滤波, 能简单、快速、准确地估计出状态向量中的位

置分量, 以达到对漏点进行正确地填补, 因此位置/速度混合卡尔曼滤波方法明显优于传统方法。

表3 不同方法的处理时间统计

Tab. 3 Statistics on processing time of different methods

Method	Single aircraft	Multiple aircraft
Simulation of real-time track acquisition	26'27.666"	30'27.979"
Equal time interval interpolation	28'8.397"	32'15.857"
Position/speed hybrid filter	26'28.083"	30'28.703"

3 结论

在实际测试中发现, 该方法对 Mode S 1090ES DF=17 格式的 ADS-B 数据处理上具有比较理想的效果。该方法不仅能给出当前时刻飞机的位置、速度等状态信息, 而且可以减小传送过程中加入的误差和干扰引起的报文丢失和错误对跟踪精度的影响, 在更正错误数据的同时缩短了航迹点的更新时间, 从而一定程度地预防了漏点问题, 提高了利用 ADS-B 进行飞机监视的准确性和实时性。

参考文献:

- [1] 中国民用航空局. 中国民用航空 ADS-B 实施规划[S]. 中国: 中国民用航空局, 2015. Civil Aviation Administration of China. China Civil Aviation ADS-B implementation planning[S]. China: Civil Aviation Administration of China, 2015.
- [2] Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA). DO-260B Minimum Operational Performance Standards for 1090 MHz Extended Squitter Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) and Traffic Information Services-Broadcast (TIS-B)[S]. Washington, D. C.: RTCA, 2011.
- [3] 钟建华, 刘卫东, 王冬冬, 等. ADS-B 监视数据质量分析研究[J]. 西安航空学院学报, 2013, 31(3): 72-75. Zhong Jianhua, Liu Weidong, Wang Dongdong, et al. Analysis on ADS-B Surveillance Data Quality[J]. Journal of Xi'an Aeronautical University, 2013, 31(3): 72-75.
- [4] 张军, 朱衍波, 林熙, 等. 一种 ADS-B 监视技术的数据评估系统: CN, ZL200710120275.9[P]. 2009-09-19. Zhang Jun, Zhu Yanbo, Lin Xi, et al. Data estimation system for ADS-B monitoring technology: China, ZL

- 200710120275.9[P]. 2009-09-19.
- [5] 李艳, 王宁. 空中交通管理监视系统中的数据处理[J]. 电子技术与软件工程, 2014(18): 211-212.
Li Yan, Wang Ning. Data Processing in Air Traffic Management and Monitoring System[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2014(18): 211-212.
- [6] Xi L, Jun Z, Yanbo Z, et al. Simulation study of algorithms for aircraft trajectory prediction based on ADS-B technology[C]// System Simulation and Scientific Computing, 2008. ICSC 2008. Asia Simulation Conference-7th International Conference on. IEEE (978-1-4244-1787-2), 2008: 322-327.
- [7] 王子龙. ADS-B 监视数据质量分析[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2013: 39.
Wang Zilong. The analysis of ADS-B surveillance data quality [D]. Guanghan: College of Air Transport Management, Civil Aviation Flight University of China, 2013: 39.
- [8] Krozel J, Andrisani D, Ayoubi M A, et al. Aircraft ADS-B data integrity check[C]// AIAA 4th Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Forum (AIAA 2004-6263). 2004: 1-11.
- [9] 张发兵. 智能高效航迹处理算法研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2012: 23-37.
Zhang Fabing. Intelligent and Efficient Processing of Algorithm Track[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2012: 23-37.
- [10] 胡曼. 基于 ADS-B 的飞行航迹处理与滤波[D]. 成都: 电子科技大学, 2012: 23-29.
Hu Man. Flight track processing and filtering based on ADS-B[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012: 23-29.
- [11] AN Ndjeng, Lambert A, Gruyer D, et al. Experimental Comparison of Kalman Filters for Vehicle Localization [C]//IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2009: 441-446.
- [12] M GREWAL M S, ANDREWS A P. Applications of Kalman filtering in aerospace 1960 to the present[J]. IEEE Control Systems (S1066-033X), 2010, 30(3): 69-78.
- [13] Zhe Chen. Bayesian Filtering: From Kalman Filters to Particle Filters, and Beyond[J]. Statistics, 2003, 182(1): 1-69.
- [14] 彭丁聪. 卡尔曼滤波的基本原理及应用[J]. 软件导刊, 2009, 8(11): 32-34.
Peng Dingcong. Basic Principle and Application of Kalman Filter [J]. Software Guide, 2009, 8(11): 32-34.
- [15] 邵帅. ADS-B 航迹处理及显示技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
Shao Shuai. Research on ADS-B Track Processing and Display Technology[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
- [16] 沈笑云, 唐鹏, 张思远, 等. ADS-B 统计数据的位置导航不确定类别质量分析[J]. 航空学报, 2015, 36(9): 3128-3136.
Shen Xiaoyun, Tang Peng, Zhang Siyuan, et al. Quality analysis of navigation uncertain category for position based on ADS-B statistical data[J]. Acta Aeronauticaet Astronautica Sinica, 2015, 36(9): 3128-3136.