基于 VHF 数据链的自动相关监视系统[1)]

张学军 屈剑明 张其善
(北京航空航天大学 电子工程系)

摘 要 介绍了基于甚高频(VHF)数据链的自动相关监视(ADS)系统的基本概念,构成原理和系统结构.为改善 ADS 系统的跟踪精度,将基于"当前"模型的卡尔曼滤波算法用于 ADS 系统数据处理.数字仿真和实际应用表明:该算法可以有效地消除由于突发干扰和飞机姿态变化造成的 ADS 报文丢失、乱码对 ADS 系统跟踪精度的影响,使 ADS 系统更为实用化.

关键词 空中交通管制; 卡尔曼滤波; 信息处理; 自动相关监视; 当前模型; 甚高频数据链
分类号 V 355.1

自动相关监视(ADS)系统[1]作为空中交通管制系统中的一种新的监视手段,受到各国普遍重视.ADS 系统从机载导航设备获得信息(至少包括飞机识别和四维位置信息),通过甚高频(VHF)地空数据链,自动且实时地发送到地面接收和处理系统,为用户提供伪雷达显示.

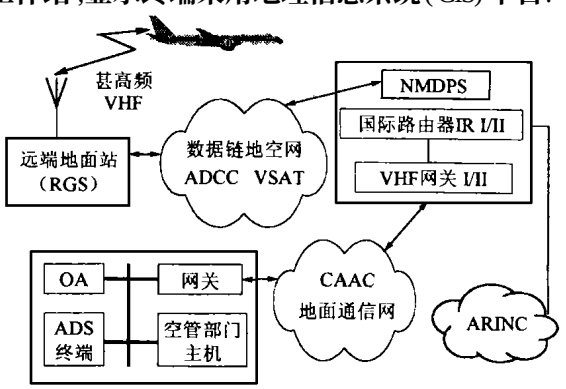
ADS 系统可以为飞行在雷达覆盖区以外,特别是海洋和荒漠空域的飞机,提供监视手段;能够及时检测到航路点引入差错和 ATC 环路差错;对当前飞行计划符合性监督和偏离检测,及时发现飞机对放行航迹的偏离情况;提供更好的航迹连续性和位置、速度、加速度估计等防止碰撞的最基本要素,从而缩减飞行间隔标准,降低虚警数目.

ADS 系统的跟踪精度是以上各种功能的保证.它将直接影响飞机冲突检测与解脱算法,较低的跟踪精度必然导致较大的飞行间隔和较大的安全余度,造成空域的浪费.

ADS 系统跟踪精度与地空数据通信网的网络结构、处理模式、传输协议、通信体制等有密切的关系.但是,对于一个固定的地空数据通信网来讲,以上因素造成的误差是一定的.而由于突发干扰、飞机姿态变化造成的报文丢失、乱码,可以采用滤波和预测技术来减小它对跟踪精度的影响.针对以上情况,本文将基于"当前"模型的卡尔曼滤波算法用于实际数据处理,表明该算法能够有效地减小报文丢失及乱码对 ADS 系统跟踪精度的影响,对 ADS 系统的实用化具有重要意义.

1 基于 VHF 数据链的 ADS 系统

一个典型的基于 VHF 数据链的 ADS 系统如图 1 所示.信息源是机载 GPS 系统,信息传输通道是 VHF 数据链,信息处理系统采用高性能的 PC 工作站,显示终端采用地理信息系统(GIS)平台.



NMDPS —网络管理与数据处理系统;
ADCC —民航数据通信有限责任公司;
CAAC —中国民用航空总局;
ARINC —Aeronautical Radio, INC;
OA —办公自动化系统

图 1 基于 VHF 数据链的 ADS 系统

2 ADS 信息处理

由于 VHF 地空数据网并未实现全球覆盖,若飞机在非 VHF 覆盖范围内,地面监控系统就无法判断飞机的位置.另外,飞机位置数据在其传送途径的各个环节不可避免地加入了误差和干扰,而

收稿日期: 1999-02-24 第一作者 男 28 岁 博士生 100083 北京
1) 国家部委基金资助项目

引起报文的丢失和错误. 因此,在 ADS 信息处理上对错误的数据进行修正,对丢失的数据进行预测,实现插补.

机载 GPS 设备提供 WGS84 坐标系[2,3]中的位置定位信息,一般以大地坐标(纬度 B_{WGS84},经度 L_{WGS84},高度 H_{WGS84})形式给出. 而卡尔曼滤波要求系统目标的动力学模型和观测模型都是线性,需要将 WGS84 大地坐标(B_{WGS84}, L_{WGS84}, H_{WGS84})转换为协议地球坐标系(X, Y, Z).

2.1 飞机飞行的"当前"统计模型

对于飞机跟踪系统,由于飞行高度仍然依靠高度表数据,而不依靠 GPS 数据,所以可以忽略高度分量状态. 为了确定其位置和速度,其状态变量可取为

$$X = [x, v_x, a_x, y, v_y, a_y]^T \tag{1}$$

民航飞机在航路上以某一加速度机动时,下一时刻的加速度取值是在"当前"加速度的邻域内,因此,在"当前"局部域内可用"当前"加速度预测代替加速度均值,同时从整个时间轴来看,随机机动加速度仍符合一阶时间相关过程. 由于在 X 向的和 Y 向的 2 组状态变量之间没有耦合,其对应的观测量也分别独立,因此,可将 X 向、Y 向的状态变量分别进行滤波处理.

以 X 向为例,"当前"统计模型为[4]

$$a_x(t) = \bar{a} + a(t) \tag{2}$$

$$\dot{a}(t) = -\frac{1}{\tau_x}a(t) + \omega(t) \tag{3}$$

式中 $a_x(t)$ 为飞机 X 方向上的加速度状态变量; $a(t)$ 为零均值有色加速度噪声; $\bar{a}$ 是机动加速度"当前"均值,且在每一采样周期内为常数; τ_x 为机动加速度时间常数; $\omega(t)$ 为均值为零,方差为 $\delta_\omega = \frac{2}{\tau_x}\delta_a$ 的白噪声, δ_a 为飞机加速度方差.

由式(2)和式(3)可得

$$\dot{a}_x(t) = -\frac{1}{\tau_x}a_x(t) + \omega_x(t) \tag{4}$$

其中 $\omega_x(t)$ 是均值为 $\frac{\bar{a}}{\tau_x}$ 的白噪声; $a_x(t)$ 均值为 $\bar{a}$,因此"当前"统计模型是一个非零均值的一阶时间相关模型. 将式(2)和式(4)写为一维状态方程,即为机动飞机"当前"统计模型,矢量形式为

$$\dot{X}(t) = AX(t) + U_x + W_x(t) \tag{5}$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1/\tau_x \end{bmatrix} \qquad U_x = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/\tau_x \end{bmatrix}$$

设采样周期为 T,将(5)式通过标准离散化处理,可得到离散状态方程为

$$X_{k+1} = \Phi_{k+1/k}X_k + U_k\bar{a} + W_k \tag{6}$$

其中状态转移矩阵为

$$\Phi_{k+1/k} = \begin{bmatrix} 1 & T & \tau_x^2(-1 + T/\tau_x + e^{-T/\tau_x}) \\ 0 & 1 & \tau(1 - e^{-T/\tau_x}) \\ 0 & 0 & e^{-T/\tau_x} \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$U_k = \begin{bmatrix} \tau_x - T + \frac{T^2}{2\tau_x} + \tau_x(1 - e^{-T/\tau_x}) \\ T - \tau_x(1 - e^{-T/\tau_x}) \\ 1 - e^{-T/\tau_x} \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中 W_k 是离散时间白噪声,并且

$$E[W_k W_{k+j}^T] = 0 \qquad j \neq 0$$

$$Q_k = E[W_k W_k^T]$$

2.2 自适应算法

加速度的均值等于"当前"时刻状态估计的加速度分量预测值,即

$$\bar{a}(k) = \hat{a}(k/k-1) \tag{9}$$

这样,在估计飞机运动状态的同时,可以获得机动加速度均值,实现了加速度均值的自适应滤波算法,从而实时地修正速度分布.

利用关系:

$$\delta_a = \frac{4-\pi}{\pi}(a_{max} - |\hat{a}_{k/k}|)^2 \tag{10}$$

可以得到噪声方差的自适应滤波算法.

对于机动飞行的"当前"统计模型,其标准卡尔曼滤波方程为

$$\hat{X}_{k/k} = \hat{X}_{k/k-1} + K_k(Y_k - H_k\hat{X}_{k/k-1}) \tag{11}$$

$$\hat{X}_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1}\hat{X}_{k-1/k-1} + U_k\bar{a}_k \tag{12}$$

$$K_k = P_{k/k-1}H_k^T(H_kP_{k/k-1}H_k^T + R_k)^{-1} \tag{13}$$

$$P_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1}P_{k-1/k-1}\Phi_{k/k-1}^T + Q_{k-1} \tag{14}$$

$$P_{k/k} = (I - K_kH_k)P_{k/k-1} \tag{15}$$

把式(9)代入式(12)可得到

$$\hat{X}_{k+1/k} = \Phi_1(T)\hat{X}_{k/k} \tag{16}$$

其中

$$\Phi_1(T) = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{T^2}{2} \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{17}$$

ADS 空地之间的通信合同分为 2 种形式:周期性合同和事件合同. 周期性合同按固定报告时间间隔 T 提供 ADS 报告;事件合同包括地理事件、偏离事件和变化事件. 当某一事件发生时,飞机按照合同发送 ADS 报告. 因此,ADS 系统中的 T 值是变化的.

本文研究的算法中将 T 值设为可变量,周期性合同是其特殊情况.

3　仿真实验结果

计算数据取自 1998 年 12 月 28 日对中国国际航空公司 B-2954 飞机实时跟踪过程中.由于飞机机载设备记录了详细的飞行数据,可以将地面接收和处理过的数据与其进行比较.

系统仿真结果如图2所示.图中曲线I峰值较高,是地面接收的数据与机载设备记录数据的差值(e),即噪声;曲线 II 峰值较低,是经过卡尔曼滤波后的数据与机载设备记录数据的差值(e).仿真结果表明,基于"当前"模型的卡尔曼滤波算法能够有效地减小报文丢失及乱码对 ADS 系统跟踪精度的影响.采用此算法的 ADS 系统已经成功地应用于中国民用航空总局总调度室运行保障系统.

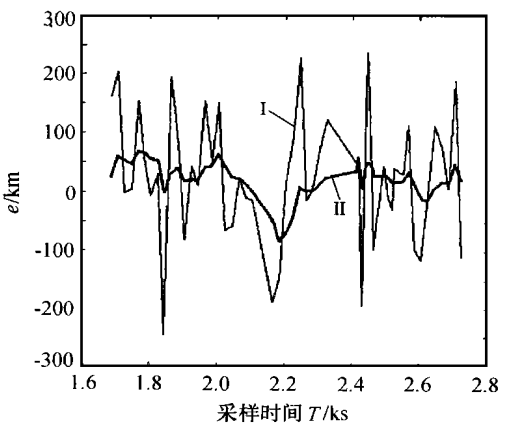


图 2　系统仿真结果

参 考 文 献

1　卢伯英,张　军,唐争由. 自动相关监视系统的研究与开发. 北京航空航天大学学报,1997,23(2):147～151

2　周忠谟,易杰军. GPS 卫星测量原理与应用. 北京:测绘出版社,1992

3　朱华统,杨元喜,吕志平. GPS 坐标系统的转换. 北京:测绘出版社,1994

4　周宏仁,敬忠良,王增德. 机动目标跟踪. 北京:国防工业出版社,1991. 135～142

5　Scott C A, Drane C R. Increased accuracy of motor vehicle position estimation by utilising map data, vehicle dynamics, and other information sources. In: Vehicle Navigation Information Systems Conference (VNIS '94). 1994

Research and Development on Automatic Dependent Surveillance System Based on VHF Datalink

Zhang Xuejun　Qu Jianming　Zhang Qishan

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Dept. of Electronic Engineering)

Abstract　The basic concept, construction principle and implementation for the ADS (Automatic Dependent Surveillance) system are presented. The tracking precision is one of the most important factors of the practicality of ADS system. The outburst disturbance and the lose of ADS message and error code caused by the change of plane's attitude severely affect the tracking precision of ADS system. An Kalman filtering algorithm based on the "Current" model is adopted to process the ADS data to improve the tracking precision of ADS system. Numerical simulation shows that this method is effective. This Kalman filtering algorithm makes the ADS system more practicable for ATC (Air Traffic Control).

Key words　air traffic control; Kalman filtering; information processing; automatic dependent surveillance; "current" model; VHF datalink