

一种飞机 ADS-B 监视数据的实时轨迹预测算法

许丹, 罗倩文

(四川九洲电器集团有限责任公司, 四川 绵阳 621000)

摘要: 在智能航空管制系统中, 精确、实时、可靠地移动飞行器不确定性轨迹预测具有较高的应用价值。目前, 大部分轨迹预测算法只重视目标轨迹的预估与复现, 没有将目标轨迹与时刻相结合, 导致只能进行目标监视事后静态评估, 而不能进行实时动态评估。针对此问题, 文章提出一种飞机 ADS-B 监视数据的实时轨迹预测算法。该算法根据目标飞机位置和速度数据拟合轨迹方程和速度方程, 构建目标飞机的时刻、速度和位置模型, 实现目标飞机状态实时估计预测。实验结果表明, 该算法能实现目标飞机的实时轨迹预测。

关键词: 轨迹预测; ADS-B; 曲线拟合

中图分类号: TN967.5

文献标识码: A

文章编号: 1674-1064 (2022) 01-037-03

DOI: 10.12310/j.issn.1674-1064.2022.01.013

航空管制系统作为国土防空体系的重要组成部分, 是国家实施空域管理、保障飞行安全、实现航空高效运输、捍卫国家空域权益的重要组成部分。目前, 军民航飞机呈现出一种高密度、全天候、广空域的运行状态, 空中交通环境越来越复杂、拥挤和多变, 获得精确、实时、可靠的飞行器轨迹和轨迹预测是实现智能航空管制的前提。

1 ADS-B

广播式自动相关监视技术 (Automatic Dependent Surveillance Broadcast, ADS-B) 是一种基于卫星定位信息, 用于航空飞行器和地面、航空飞行器和航空飞行器之间以数据链的形式完成地一空、空一空监视的技术。

1.1 ADS-B监视系统

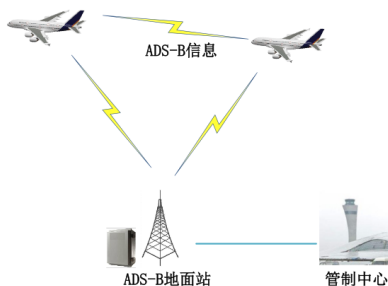


图1 ADS-B侦收系统示意图

ADS-B监视系统主要由飞机、ADS-B地面站和管制中心组成。ADS-B机载设备可以具备ADS-B IN和ADS-B OUT两种功能设备, 如图1所示。ADS-B OUT设备周期性地向空中发送下行信息, 一般包括: 飞行器识别码 (ID)、经度、高度、速度、方向、和爬升率等信息, 数据来源于飞行器上的各个传感器系统。ADS-B IN设备具备接收和处理其他航空器发送的ADS-B OUT信息, 同时接收ADS-B地面站发送的交通信息服务广播、气象状

况服务广播和自动相关监视转播等信息。ADS-B地面站主要接收机载ADS-B设备发送的信号, 将处理后的信息发送给管制中心, 并将管制中心下发的广播转播信息通过天线发送给区域内的飞行器。管制中心接收各种渠道的飞行器信息、气象信息、流量信息等, 经过加工处理, 发布交通管制任务。

1.2 ADS-B报文

ADS-B报文格式是由国际民航组织ICAO牵头制定, 主要包括ICAO ANNEX 10 Vol.IV标准、ICAO DOC9871标准、DO-260等。ADS-B主要包含三种数据链标准: UAT (Universal Access Transceiver)、VDL-4 (Very High Frequency Data Link Mode 4) 和1090ES (1090 MHz Extended Squitter)。ICAO推荐使用1090ES数据链, 并得到了广泛使用。1090ES数据链的下行频率为1090 MHz, 每个消息单元包含前导脉冲 (8 us) 和数据块 (112 bit) 两个部分, 数据传输速率为1 Mbit/s, 如图2所示。

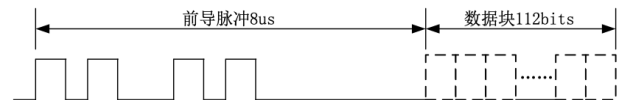


图2 ADS-B帧报文示意图

前导脉冲包含4个脉冲, 每个脉冲的时间长度为0.45 us ~ 0.55 us, 第1个脉冲与第2个脉冲时间间隔为1 us, 第2个脉冲与第3个脉冲时间间隔为2 us, 第3个脉冲与第4个脉冲时间间隔为1.5 us。1090ES数据链报文包含5个字段: DF、CA、AA、ME和PI字段。DF字段为5 bit, 区分S模式或其他模式发射机发送的ADS-B信号; CA字段为3 bit, 描述S模式发射机和接收机的性能; AA字段为24 bit, 表示24位ICAO号; ME字段为56 bit, ADS-B消息主要内容; PI字段为24 bit, 即24位校验位, 如表1所示。

表1 字段名与位对应关系表

位	1-5	6-8	9-32	33-88	89-112
字段名	DF	CA	AA	ME	PI

ME字段为主要有用信息, 内容主要包括位置信息 (高

度、经度、纬度)、速度信息(东速、西速、南速、北速、上速、下速)、身份信息(ICAO号、航班号)、状态信息(导航数据源、高度、气压等状况)等。

通过接收ADS-B实时数据,即可对其进行处理和轨迹预测。

2 实时轨迹预测算法

文章提出一种飞机ADS-B监视数据的实时轨迹预测算法,该算法主要是通过接收ADS-B的监视数据,根据目标飞机位置、速度数据拟合轨迹方程和速度方程,构建目标飞机的时刻、速度和位置模型,实现目标飞机状态实时估计预测。具体流程图如图3所示,主要包括接收ADS-B数据、坐标转换、方向判断、速度时间方程拟合、速度预估、路程计算、曲线轨迹方程拟合与计算、直线位置计算和坐标转换等步骤^[1]。

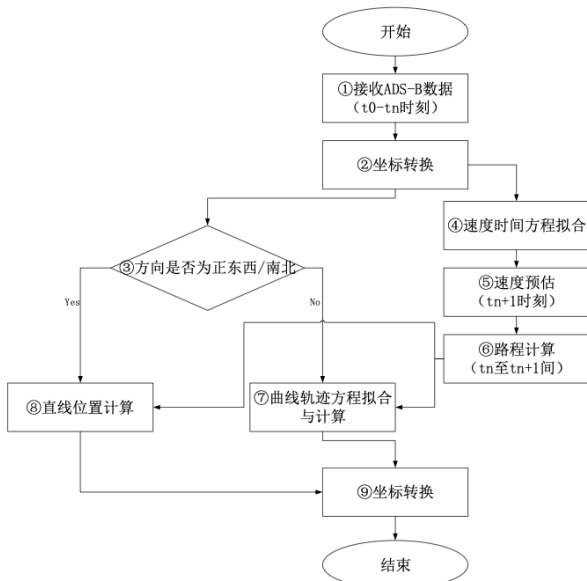


图3 实时轨迹预测算法流程图

2.1 接收ADS-B数据 (t₀至t_n时刻)

接收到的目标ADS-B时刻t₀至t_n的数据,通过平滑滤波处理,剔除奇异点,处理后的数据如下: G(i)=[φ_i, λ_i, h_i, V_i, t_i], n≥i≥0, φ_i为纬度, λ_i为经度, h_i为高度, V_i为速度, t_i为时刻。本算法中仅将轨迹映射到经度—纬度维进行预测,不进行高度预测。若对高度进行预测,则同理将轨迹映射到东向—高度维或者北向—高度维进行预测。

2.2 坐标转换

大地坐标系(WGS-84)(φ₁, λ₁, h₁)转换到站心坐标系(Δe_i, Δn_i, Δu_i)。

$$\begin{aligned} \Delta e_i &= (\lambda_i - \lambda_0) \cdot a \cdot \cos \phi_i \\ \Delta n_i &= (\phi_i - \phi_0) \cdot a \\ \Delta u_i &= (h_i - h_0) \\ n \geq i \geq 1 \\ a &= 6378137 \end{aligned}$$

2.3 方向判断(方向是否为正东西/南北)

通过判断东向和北向变化量,判断航迹方向是否为正东西或者正南北。

$$j = \left(\sum_{i=0}^n \Delta e_i^2 = 0 \right) \wedge \left(\sum_{i=0}^n \Delta n_i^2 = 0 \right) \wedge \left(\sum_{i=0}^n \Delta e_i^2 \neq 0 \right) \wedge \left(\sum_{i=0}^n \Delta n_i^2 / \sum_{i=0}^n \Delta e_i^2 \leq 0.0001 \right) \wedge \left(\sum_{i=0}^n \Delta n_i^2 \neq 0 \right) \wedge \left(\sum_{i=0}^n \Delta e_i^2 / \sum_{i=0}^n \Delta n_i^2 \leq 0.0001 \right)$$

如果j=1,则轨迹为正南北或者正东西;如果j!=1,则轨迹为非正南北或者非正东西^[2]。

2.4 速度时间方程拟合

设定V_i与Δt_i二阶曲线V(Δt)=f(b, Δt)=b₀+b₁·Δt+b₂·Δt²。拟合方程和实际观测值在各点的残差,利用加权平均方法实现残差最小。

$$\Delta t_0 = 0$$

$$\Delta t_i = t_i - t_0, n \geq i \geq 1$$

$$\text{Min} \left(\sum_{i=0}^n (V_i - (b_0 + b_1 \cdot \Delta t_i + b_2 \cdot \Delta t_i^2))^2 \right)$$

$$b_0 = \left(\sum_{i=0}^n V_i - b_1 \cdot \sum_{i=0}^n \Delta t_i - b_2 \cdot \sum_{i=0}^n \Delta t_i^2 \right) / (n+1)$$

$$b_1 = \left(\sum_{i=0}^n V_i \cdot \Delta t_i - b_0 \cdot \sum_{i=0}^n \Delta t_i - b_2 \cdot \sum_{i=0}^n \Delta t_i^3 \right) / \sum_{i=0}^n \Delta t_i^2$$

$$b_2 = \left(\sum_{i=0}^n V_i \cdot \Delta t_i^2 - b_0 \cdot \sum_{i=0}^n \Delta t_i^2 - b_1 \cdot \sum_{i=0}^n \Delta t_i^3 \right) / \sum_{i=0}^n \Delta t_i^4$$

2.5 速度预估

求解时刻t_n下一时刻t_{n+1}(比如下一整秒)的速度大小V_{n+1}。

$$t_{n+1} = (\text{int})(t_n + 1)$$

$$\Delta t_{n+1} = t_{n+1} - t_0$$

$$V_{n+1} = b_0 + b_1 \cdot \Delta t_{n+1} + b_2 \cdot \Delta t_{n+1}^2$$

2.6 路程计算

通过速度时间曲线V(Δt)=f(b, Δt)=b₀+b₁·Δt+b₂·Δt²,积分求解时刻t_n至t_{n+1}的路程。

$$R_{n+1} = \int_{\Delta t_n}^{\Delta t_{n+1}} f(b, \Delta t) d\Delta t$$

2.7 曲线轨迹方程拟合与计算

设定二阶曲线Δn(Δe)=f(a, Δe)=a₀+a₁·Δe+a₂·Δe²。拟合方程和实际观测值在各点的残差,利用加权平均方法实现残差最小。

$$\text{Min} \left(\sum_{i=0}^n (\Delta n_i - (a_0 + a_1 \cdot \Delta e_i + a_2 \cdot \Delta e_i^2))^2 \right)$$

$$a_0 = \left(\sum_{i=0}^n (\Delta n_i - a_1 \cdot \sum_{i=0}^n \Delta e_i - a_2 \cdot \sum_{i=0}^n \Delta e_i^2) \right) / (n+1)$$

$$a_1 = \left(\sum_{i=0}^n (\Delta n_i \cdot \Delta e_i - a_0 \cdot \sum_{i=0}^n \Delta e_i - a_2 \cdot \sum_{i=0}^n \Delta e_i^3) \right) / \sum_{i=0}^n \Delta e_i^2$$

$$a_2 = \left(\sum_{i=0}^n (\Delta n_i \cdot \Delta e_i^2 - a_0 \cdot \sum_{i=0}^n \Delta e_i^2 - a_1 \cdot \sum_{i=0}^n \Delta e_i^3) \right) / \sum_{i=0}^n \Delta e_i^4$$

通过求解,得到位置曲线方程Δn(Δe)=f(a, Δe)=a₀+a₁·Δe+a₂·Δe²。

在t_n时刻位置(Δe_n, Δn_n)以半径R_{n+1}作圆。

$$(\Delta e_{n+1} - \Delta e_n)^2 + (\Delta n_{n+1} - \Delta n_n)^2 = R_{n+1}^2$$

通过轨迹方向性排除错误解,得到t_{n+1}时刻位置(Δe_{n+1}, Δn_{n+1})。

2.8 直线位置计算

通过判断方向为正东西或正南北。

当正东西时, Δn_{n+1}=0, Δe_{n+1}=Δe_n+R_{n+1};

当正南北时, Δe_{n+1}=0, Δn_{n+1}=Δn_n+R_{n+1};

得到t_{n+1}时刻的位置(Δe_{n+1}, Δn_{n+1})。

2.9 坐标转换

站心坐标系(Δe_{n+1}, Δn_{n+1}, Δu_{n+1})转换到大地坐标系(WGS-84)(φ_{n+1}, λ_{n+1}, h_{n+1})。

$$\lambda_{n+1} = \Delta e_{n+1} / (a \cdot \cos(\Delta n_{n+1} / a + \phi_0)) + \lambda_0$$

$$\phi_{n+1} = \Delta n_{n+1} / a + \phi_0$$

$$h_{n+1} = \Delta u_{n+1} + h_0$$

通过下一航迹点的预测, 迭代放入数据组内, 可以实现一定时间段的轨迹预测^[3]。

3 实验

从真实飞行轨迹中截取一段, 包括位置、姿态、速度、加速度、时刻等信息。截取的真实轨迹如图4所示。图5为利用上述实时轨迹预测算法预测的预测轨迹, 图6为真实轨迹和预测轨迹的对比图。通过对比图可以发现, 预测轨迹与真实轨迹比较拟合, 符合算法预期效果^[4]。

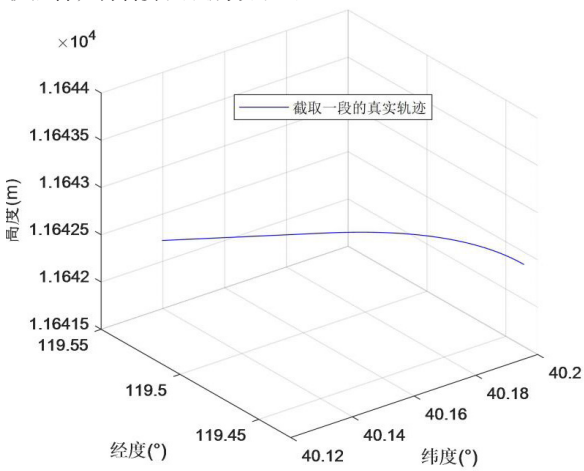


图4 截取的真实轨迹图

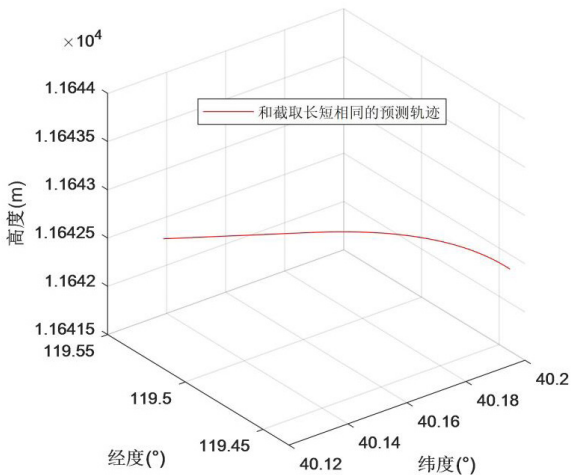


图5 预测轨迹图

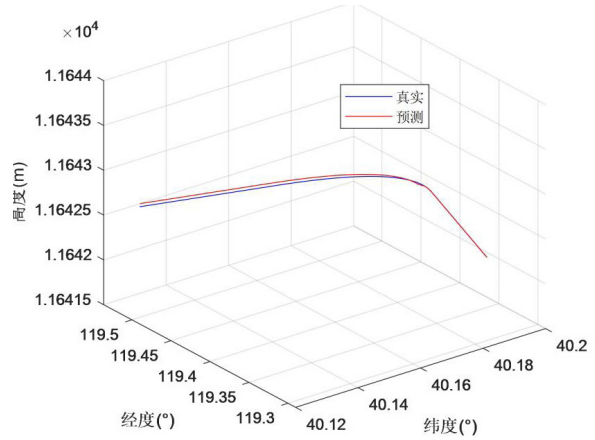


图6 预测和真实轨迹对比图

4 结语

文章关注实时轨迹预测, 提出一种飞机ADS-B监视数据的实时轨迹预测算法。该算法利用目标飞机位置和速度数据拟合轨迹方程和速度方程, 构建目标飞机的时刻、速度和位置模型, 实现目标轨迹实时估计预测。实验结果表明, 该算法能实现目标的实时轨迹预测, 具有实际工程应用价值。

参考文献

- [1] 李嘉林. 飞机飞行航迹计算[D]. 西安: 西北工业大学, 1991.
- [2] 乔少杰, 金琨, 韩楠, 等. 一种基于高斯混合模型的轨迹预测算法[J]. 软件学报, 2015(5): 1048-1063.
- [3] 张强, 张振标. 基于曲线拟合的机动目标轨迹预测算法研究[J]. 信息化研究, 2018(6): 12-15, 30.
- [4] 杨燕琳, 冶忠林, 赵海兴, 等. 基于高阶近似的链路预测算法[J]. 计算机应用, 2019(8): 2366-2373.