文章编号:1001 - 893X(2011)08 - 0046 - 05

基于飞机降落信息的 ADS - B 数据跟踪算法*

唐小明,王贞杰,张 涛

(海军航空工程学院 信息融合研究所,山东 烟台 264001)

摘 要:在空中交通管制(ATC)领域,广域监视系统中的 ADS - B 接收机在飞机飞行方向改变时,由于其收星的数量减少导致数据率变低,并且在飞机降落过程中丢点严重。结合 ADS - B 数据的特点,采用两个模型分别表示飞机的匀速运动和匀加速运动状态,利用三点速度方向预测修正对地速度,并引入飞机降落的先验模型,实现在广域监视中对飞机的有效跟踪。真实数据验证了该方法可有效提高数据率和改善飞机降落过程中的跟踪效果。

关键词:空中交通管制;ADS - B;降落信息;跟踪算法;外推模型

中图分类号:TN967.5 **文献标识码**:A doi:10.3969/j.issn.1001 - 893x.2011.08.010

A Novel ADS - B Data Tracking Algorithm Based on Aircraft Landing Information

TANG Xiao-ming, *WANG Zhen-jie*, *ZHANG Tao*

(Research Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 246001, China)

Abstract: In the field of air traffic control(ATC), the data rate of ADS - B receiver in the Wide Area Surveillance System(WASS) is depressed because of the amount of secondary planet from which ADS - B receive data reduces when the aircraft change its direction. And the data points lose seriously in the process of the aircraft landing. Tracking the aircraft is achieved with two models used to represent the state of uniform motion of aircraft and uniformly accelerated motion, three - point speed direction forecast, and the model of the aircraft landing on the base of the characteristics of ADS - B data. Simulation based on the real data is done to validate the model. The results show that this method can effectively improve the data rate and the effect of tracking aircraft in the process of aircraft landing.

Key words: air traffic control; ADS - B; landing information; tracking algorithm; extrapolation model

1 引 言

广播式自动相关监视技术(ADS - B)是一种基于 GPS 全球卫星定位系统和空 - 空、地 - 空数据链通信的航空器运行监视技术,是国际上解决空中交通管制最有效的办法[1]。它的出现为空中交通管制提供了技术支持和解决途径。根据相对于航空器的信息传递方向,机载 ADS - B 应用功能可以分为发送(OUT)和接收(IN)两类。OUT 相当于播报设备,是指航空器发送其位置信息和其它信息;IN 是接收设备[2]。信息在发射设备和接收设备之间传输时,可能由于干扰而丢失或出错,导致 ADS - B 数据率降低。另外,飞机在姿态改变时,尤其是降落过程中,由于收星的数量减少也会导致数据率下降,甚至在某一时段出现“盲区”。本文介绍的引入飞机降落模型的外推跟踪算法解决了在数据率低的情况下对

* 收稿日期:2011 - 03 - 31;修回日期:2011 - 05 - 31

目标实现不间断连续跟踪的问题,满足广域交通管制的数据率要求。

2　数据预处理

2.1　ADS－B 数据特点

ADS－B 被成功应用于空中交通管制,其工作原理如图 1 所示。

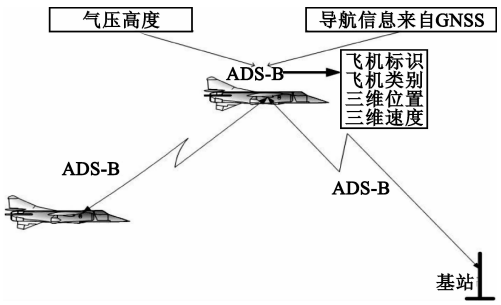


图 1　ADS－B 应用于空中交通管制的原理
Fig.1 The principle of ADS－B used in air traffic control

图 1 给出了 ADS－B 设备数据的来源及主要的数据信息,包括飞机航班号、时刻、GPS 位置信息(包括经度、纬度和高度)、对地速度、爬升速度等信息[3],这些信息为定位跟踪提供了依据。

当飞机飞行姿态改变时,一般会伴随速度和方向的改变,此时由于姿态的改变,安装在机顶的 GPS 天线收星的数量会减少,引起 GPS 定位数据的减少。基于速度和加速度的跟踪模型会存在一定误差。

飞机测高有两种方法,一种是气压测高,另一种是无线电测高,民航飞机多采用前者[4]。气压测高的精度较低,ADS－B 设备的高度精度为15 m左右,也就是说,飞机在高度上会产生跳变,如图 2 所示。

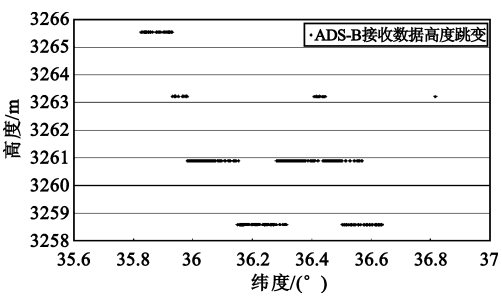


图 2　纬度高度图
Fig.2 The figure of latitude and height

高度跳变会产生升速方向的加速度,导致在高度上的跟踪误差变大,误差大小主要与高度跳变量和数据点间的时差有关。

ADS－B 下传的数据偶尔存在错误,如表 1 所示。

表 1　下传的错误数据点
Table 1 The error data points

时刻	高度 /m	对地速度 /(m/s)	升速 /(m/s)	纬度 /(°)	经度 /(°)
13859531	10 698.48	225.223 58	0	36.378 43	120.847 97
13900562	35 100	225.223 58	0	36.378 48	120.847 95

时刻的格式为时、分、秒、毫秒,如 13859531 表示 1 时 38 分 59 秒 531 毫秒。可知,数据点之间相隔 1 秒 31 毫秒,而经纬度相差在小数点后第五位,按照 1°约等于112 km,两点之间的距离大约为6.03 m,按照常理,飞机在 1 秒 31 毫秒的时间内不可能仅仅移动6.03 m,这种“野值”也会导致跟踪误差,但可以通过飞机航行中速度的先验信息来剔除。

2.2　对有关参数预先处理

对 ADS－B 数据进行预先处理,把 GPS 信息及速度信息转换为我们熟知的表示形式,主要包括以下几个步骤:

(1)把 ADS－B 中的时刻转化为毫秒,便于在毫秒级确定跟踪步长,文中跟踪设定的数据点间隔为 20 ms;

(2)GPS 位置信息转换为大地直角坐标系的 X、Y 和 Z;

(3)对地速度的方向用三点速度方向预测,所谓三点速度方向预测是指当前点起始的对地速度方向是当前数据点与前两个数据点分别连线的角平分线,具体算法在外推模型中介绍,最后将对地速度分解;

(4)升速方向为大地直角坐标系坐标原点与目标位置点连线的方向,依据在直角坐标系下的分解方法分解,具体做法在外推模型中介绍。

3　外推模型

3.1　三点速度方向预测及对地速度分解模型

对地速度方向预测的正确与否是能否跟踪目标的关键,因为 ADS－B 接收的数据点较密集,两个数据点之间的距离很短,稍微的数据抖动都可能造成跟踪方向的偏差。针对此,本文采用了三点速度方向预测来修正对地速度的方向,如图 3 所示。

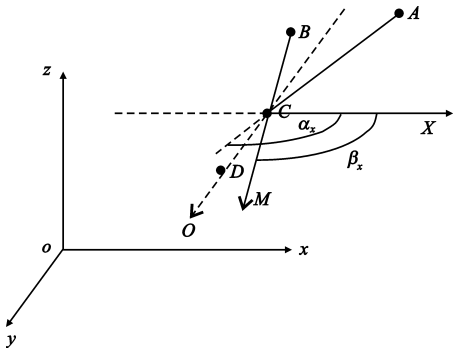


图 3 三点速度方向预测

Fig.3 Three-point speed direction prediction

图 3 中 A、B、C、D 依次表示 4 个数据点，A 为起点，其中 B 点有扰动，CX 与 X 轴平行，如果不平滑，CD 段跟踪会出现较大偏差，如图中的 $\boldsymbol{CM}$。图 3 中向量 $\boldsymbol{CO}$ 表示三点速度方向预测后 C 点的跟踪方向。ADS－B 接收的数据首先转换到大地直角坐标系下，对地速度和升速都在直角坐标系下进行分解，求解 C 点对地速度在大地直角坐标系下 3 个分速度大小的过程如下（以求解 X 轴方向的分解速度大小为例）：

令 $A(x_a, y_a, z_a)$、$B(x_b, y_b, z_b)$、$C(x_c, y_c, z_c)$，C 点对地速度大小为 v_e，AC 延长线与 X 轴夹角为 α_x，BC 延长线与 X 轴的夹角用 β_x 表示，在三点速度方向预测后，C 点对地速度在 X 轴的分量大小为 v_{ecx}，则有如下关系式：

$$\alpha_x = \arccos((x_c - x_a)/\sqrt{(x_c - x_a)^2 + (y_c - y_a)^2 + (z_c - z_a)^2}) \quad (1)$$

$$\beta_x = \arccos((x_c - x_b)/\sqrt{(x_c - x_b)^2 + (y_c - y_b)^2 + (z_c - z_b)^2}) \quad (2)$$

$$v_{ecx} = v_e \cos((\alpha_x + \beta_x)/2.0) \quad (3)$$

同理，得在 Y 轴和 Z 轴的分量大小分别为 v_{ecy} 和 v_{ecz}。

3.2 升速分解

升速方向为大地直角坐标系坐标原点与目标位置点连线，可依据在直角坐标系下的分解方法分解，如图 4 所示。

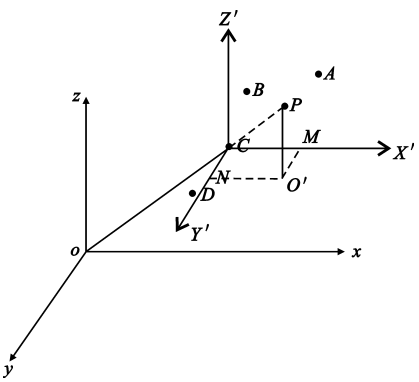


图 4 大地直角坐标系下升速分解

Fig.4 Climb rate decomposition in the Cartesian coordinate system

其中，$\boldsymbol{CP}$ 是 C 点的升速，$\boldsymbol{CP}$ 在三个维度上的分解速度分别为 $\boldsymbol{CM}$、$\boldsymbol{CN}$、$\boldsymbol{O'P}$，大小分别为 v_{upcx}、v_{upcy}、v_{upcz}。

设在直角坐标系下，C 点在 X 轴、Y 轴和 Z 轴的速度大小分别为 v_{cx}、v_{cy}、v_{cz}，则：

$$v_{cx} = v_{upcx} + v_{ecx} \quad (4)$$

$$v_{cy} = v_{upcy} + v_{ecy} \quad (5)$$

$$v_{cz} = v_{upcz} + v_{ecz} \quad (6)$$

由 B 及其前两个点的数据信息可以得到 B 点在 3 个维度上的速度大小分别为 v_{bx}、v_{by}、v_{bz}。另外，B、C 数据点的时刻已知，可分别设为 t_b、t_c，则 C 点在 3 个维度上的加速度大小 a_{cx}、a_{cy}、a_{cz} 为

$$a_{cx} = \frac{v_{cx} - v_{bx}}{t_c - t_b}, a_{cy} = \frac{v_{cy} - v_{by}}{t_c - t_b}, a_{cz} = \frac{v_{cz} - v_{bz}}{t_c - t_b} \quad (7)$$

3.3 外推

根据已得到的数据，通过坐标转换可以得到目标点在大地直角坐标系下的坐标位置，通过三点速度方向预测和速度分解与合成可以得到数据点的位置信息、速度信息和加速度信息。在 3 个维度上对目标进行外推，基本模型如下：

设第 k 时刻 C 的位置信息为 $C_k(x_{ck}, y_{ck}, z_{ck})$，速度大小为 $v_{ck}(v_{cxk}, v_{cyk}, v_{czk})$，加速度为 $a_{ck}(a_{cxk}, a_{cyk}, a_{czk})$，数据点外推时间间隔为 T，则有外推公式如下：

$$v_{cx(k+1)} = a_{cx}T + v_{cxk} \quad (8)$$

$$v_{cy(k+1)} = a_{cy}T + v_{cyk} \quad (9)$$

$$v_{cz(k+1)} = a_{cz}T + v_{czk} \quad (10)$$

$$x_{c(k+1)} = x_{ck} + v_{cxk}T + 0.5a_{cx}T^2 \quad (11)$$

$$y_{c(k+1)} = y_{ck} + v_{cyk}T + 0.5a_{cy}T^2 \quad (12)$$

$$z_{c(k+1)} = z_{ck} + v_{czk}T + 0.5a_{cz}T^2 \quad (13)$$

通过加速度的改变，可以实现匀速模型和匀加速模型的转换。

4 飞机降落的先验信息

飞机在起飞和降落过程中，基于广域监视的 ADS－B 接收机接收的数据点明显减少，给广域跟踪带来困难。但是，飞机的起飞和降落遵循一定的规律，可以在跟踪模型中合理引用飞机起降的先验参数信息，达到在飞机起飞和降落过程中的有效跟踪。

由飞行员口述和对周围某机场起降飞机的监视得到飞机降落的基本模型[5,6]如图 5 所示，基本参数根据机场的具体情况有所改变，可以通过对飞机

降落批次下传数据的研究来修正。

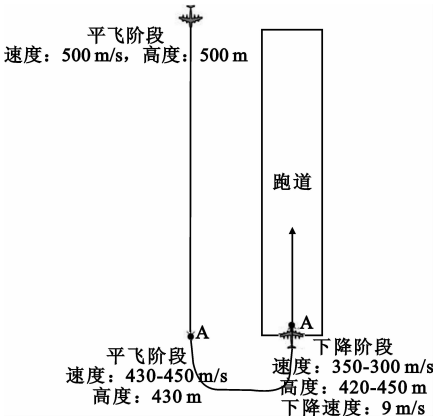


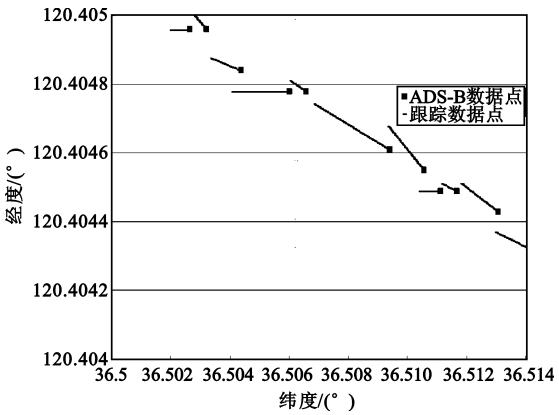
图 5　飞机降落的基本模型

Fig.5 The basic model of aircraft landing

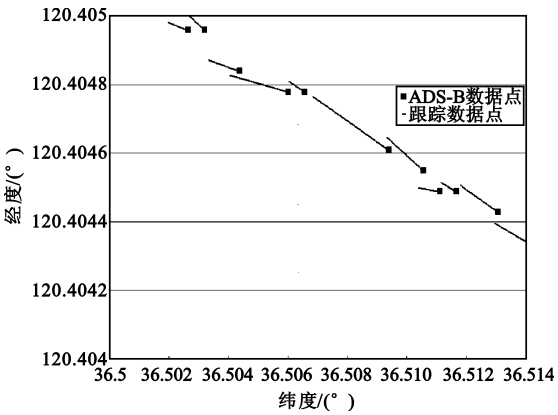
通过对周围某机场的监视,在该机场降落的飞机有以下特点:飞机从其巡航高度开始第一阶段下降,升速为 －8 m/s 左右,升速加速度在 －1.5～－1 m/s^2 之间,对地速度加速度在 －0.1～－0.01 m/s^{2}之间,下降到1.2 km左右开始平飞调整飞行姿态,调整结束后开始第二阶段下降,下降过程中伴随着飞行方向的改变,运动过程比较复杂,且丢点更加严重,本文仅对第一阶段下降参数进行模型化并应用于实际工程。飞机降落的先验信息可能根据机场和外界条件的不同而有所改变,但基本的信息可以通过对机场飞机降落的监视来得到。

5　实例分析

通过对机场民航飞机的跟踪测试,用三点速度预测可有效提高跟踪精度,如图 6 所示,引入飞机降落模型前后的跟踪精度如图 7 所示。



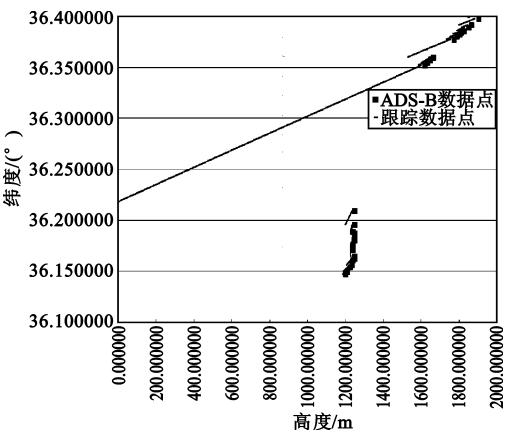
(a)没有用三点速度方向预测



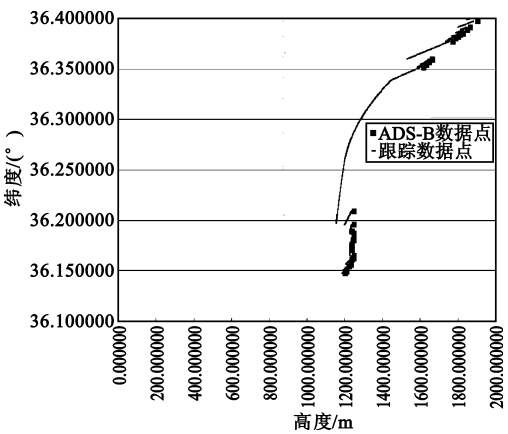
(b)用三点速度方向预测

图 6　三点速度方向预测前后对比

Fig.6 Tracking effect before and after using three points speed direction predication



(a)不引入飞机降落模型



(b)引入飞机降落模型

图 7　引入飞机降落模型前后对比

Fig.7 Tracking effect before and after using the model of the aircraft landing

图 6(b)中,如果跟踪数据率为50 Hz,当两个数据点时差在10 s以内时,误差小于0.000 1°。

针对周边某机场飞机进行广域监视,本文引入的先验信息为当飞机升速大于 -6 m/s且高度大于1 371 m,则标记飞机进入第一阶段下降;如果高度在1 371 ~ 1 524 m之间,升速和对地速度为递减阶段,升速的加速度为 -1.25 m/s^2,对地速度的加速度为 -0.05 m/s^2。由图 7(a)可知,如果不引入飞机的先验信息,当飞机降落时,由于丢点严重,数据点时间间隔较长,可能会出现跟踪到高度低于机场高度的情况。引入适当的先验信息,合理修正飞机的下降高度、速度等参数可有效改善跟踪效果,如图 7(b)所示。

6 结 论

本文通过对 ADS - B 下传数据的分析,建立了一个有效的跟踪模型,解决了在飞机飞行方向改变和降落过程中丢点严重的情况下对其进行广域跟踪监视的问题。根据 ADS - B 下传数据的特点,结合坐标转换将对地速度和升速进行分解,为外推模型的建立提供参数和依据。外推跟踪采用直线匀速外推和直线匀加速外推,在时间间隔不大的情况下,能够对目标进行有效跟踪,引入飞机降落的先验信息,实现了从飞机起飞到飞机降落的全程广域监视跟踪。由于数据点的抖动,直线外推通常会导致跟踪曲线不平滑,时间过长引起跟踪具有较大误差,本文通过用三点速度方向预测的方法处理数据,改善了跟踪效果。针对飞机第二阶段的降落过程,其降落是由机场监视系统和导航系统来引导完成,随具体情况变化较大,文中没有对其进行建模。关于 ADS - B 数据“野值”剔除的方法,文中没有进行讨论,实际运用中必须考虑剔除“野值”来避免较大的跟踪误差。

参考文献:

[1] 李自俊.ADS - B 广播式自动相关监视原理及未来的发展和应用[J].中国民航飞行学院学报,2008,19(5):11 - 14.
LI Zi - jun. Future application and development and principles of ADS - B [J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China,2008,19(5):11 - 14. (in Chinese)

[2] George Wright. NAV CANADA implements ADS - B[C]// Proceedings of Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference. Arlington, VA:IEEE,2009:1 - 9.

[3] 张青竹,张军,刘伟,等.民航空管应用 ADS - B 的关键问题分析[J].电子技术应用,2007,33(9):72 - 74.
ZHANG Qing - zhu, ZHANG Jun, LIU Wei, et al. Investigation for main problem of ADS - B implementation in ATM [J]. Application of Electronic Technique, 2007,33(9):72 - 74. (in Chinese)

[4] 张蔚.二次雷达原理[M].北京:国防工业出版社,2009:21 - 22.
ZHANG Wei. Secondary Radar Principle [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 21 - 22. (in Chinese)

[5] 美国联邦航空局.飞机飞行手册[M].陈新河,译.上海:上海交通大学出版社,2010.
Federal Aviation Administration. Airplane Flying Handbook [M]. Translated by CHEN Xin - he. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2010. (in Chinese)

[6] 伊尔曼.飞行员航空知识手册[M].王同乐,杨新涅,译.北京:航空工业出版社,2010.
Paul E Illman. The Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge[M]. Translated by WANG Tong - le, YANG Xin - nie. Beijing: Aviation Industry Press, 2010.(in Chinese)

作者简介:

唐小明(1974—),男,浙江淳安人, 2004 年于海军工程大学获博士学位,现为副教授,主要研究方向为雷达系统;

TANG Xiao - ming was born in Chun'an,Zhejiang Province,in 1974.He received the Ph.D. degree from Naval Aeronautical and Astronautical University in 2004.He is now an associate professor. His research direction is radar system.

王贞杰(1986—),男,河南商丘人,现为硕士研究生,主要研究方向信号检测、估计与目标识别;

WANG Zhen - jie was born in Shangqiu, Henan Province, in 1986. He is now a graduate student. His research interests include signal detection, estimation and target identification.

Email:wang_frank@163.com

张 涛(1986—),男,四川蓬溪人,现为硕士研究生,主要研究方向信号检测、估计与目标识别。

ZHANG Tao was born in Pengxi,Sichuan Province,in 1986.He is now a graduate student. His research interests include signal detection, estimation and target identification.