

机载防撞系统ACAS X高度跟踪器目标跟踪算法

姚丽萍, 彭良福*

西南民族大学电子信息学院, 四川 成都

收稿日期: 2021年8月26日; 录用日期: 2021年10月7日; 发布日期: 2021年10月14日

摘要

高度跟踪器能否有效地在新一代机载防撞系统(ACAS X)的垂直面上工作是设计的关键。在传统研究中, 高度率估算不够准确是非线性跟踪器的一个弊端, 线性跟踪器因报告中的“粗量化”精度使得性能劣化。为了使目标飞机状态值处理更加稳定, 该研究使用量化量测状态估计算法, 将飞机状态不确定性作为概率分布来描述, 量化视为高斯噪声并使用Sheppard校正, 通过Kalman滤波算法对飞机垂直面上的状态进行估计。实验结果显示, 该算法在高度跟踪的精度上优于传统设计, 可以有效做出防撞决策, 为ACAS X系统提供更高的可靠性。

关键词

卡尔曼滤波, ACAS X, 高度跟踪器, 量化量测

Target Tracking Algorithm of Airborne Collision Avoidance System ACAS X Height Tracker

Liping Yao, Liangfu Peng*

School of Electrical Information, Southwest Minzu University, Chengdu Sichuan

Received: Aug. 26th, 2021; accepted: Oct. 7th, 2021; published: Oct. 14th, 2021

Abstract

Whether the height tracker can effectively work on the vertical plane of the new generation of airborne collision avoidance system (ACAS X) is the key to the design. In traditional research, inaccurate height rate estimation is a drawback of nonlinear trackers, and linear trackers have de-

*通讯作者。

teriorated accuracy due to the “coarse quantization” reported in the report. In order for the tracker to process the target aircraft state more stably, the research uses quantitative measurement state estimation algorithm, which describes the aircraft state uncertainty as a probability distribution, quantizes it as Gaussian noise and uses Sheppard correction, and estimates the state of the aircraft on the vertical plane through the Kalman filter algorithm. Experimental results show that the algorithm is superior to traditional designs in high tracking accuracy, can effectively make anti-collision decisions, and provide higher reliability for ACAS X.

Keywords

Kalman Filter, Airborne Collision Avoidance System X, Height Tracker, Quantitative Measurement

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

二十世纪八十年代, 林肯实验室使用基于 α - β 滤波原理的高度跟踪器[1], 为机载防撞系统(Traffic Collision Avoidance System, TCAS)的设计提供高度和高度率的有效估计, 但是 α - β 跟踪器对飞机高度报告不进行飞机真实意图判断就进行平滑处理, 会产生瞬态过冲现象, 不利于防撞决策的选择[2]。目前, 全球范围的民航飞机装备的 TCAS II 都是采用非线性高度跟踪器, 它利用高度量化层占用时间间接估计高度率的方法, 解决了 α - β 跟踪器带来的性能劣化。在传统高度跟踪器的滤波算法中, 无论是 α - β 线性滤波, 还是非线性滤波器, 例如无迹卡尔曼滤波、扩展卡尔曼滤波等, 在处理高度数据时, 将数据点作为独立的测量值, 导致误差的不相关性, 可能产生与实际情况相悖的结果[3]。

针对以上问题, 本文参考 RTCA (Radio Technical Commission for Aeronautics) 制定的《机载防撞系统 X (ACAS X) 的最低运行性能标准》, 使用一种量化量测进一步划分为小区间求均值近似的最小均方差估计(MMSE)的方法, 对目标飞机的高度观测值进行估计, 即将状态的不确定性作为概率分布, 量化过程视为高斯噪声并使用 Sheppard 校正处理量化, 通过卡尔曼滤波预测值, 修正目标飞机的高度观测值, 完成了对目标飞机在垂直方向上的高度跟踪器跟踪算法的设计与仿真[4]。

2. α - β 跟踪器滤波原理

在传统的机载防撞系统中, 当气压高度以 25 ft 量化精度生成高度报告时, 高度跟踪器采用的滤波方式是 α - β 滤波器, 这种滤波方式的原理和实现较为简单[5]。

α - β 滤波器是针对匀速运动目标的一种常增益滤波器, 其形式和 Kalman 滤波器相似。经过一步预测得到的预测值, 其值与测量值之间存在的残差, 记为 \hat{r}_k 。当目标飞机数据传入高度跟踪器时, 采用选定的 α 和 β 常数, 使用残差的 α 倍校正飞机的高度估计, 使用 β 乘以残差来校正飞机的高度率估计:

$$\hat{z}_k = \hat{z}_{k|k-1} + \alpha \hat{r}_k \quad (1)$$

$$\hat{z}_k = \hat{z}_{k|k-1} + (\beta/T) \hat{r}_k \quad (2)$$

式中, \hat{z}_k 是高度估计值, $\hat{z}_{k|k-1}$ 是高度的一步预测值, \hat{z}_k 是高度率估计值, $\hat{z}_{k|k-1}$ 是高度率的一步预测值。为了保证系统的稳定性, α 和 β 是一个很小的正值, 满足: $0 < \alpha < 1$, $0 < \beta \leq 2$, $0 < 4 - 2\alpha - \beta$ 。

3. 非线性高度跟踪器滤波原理

对于 S 模式 25 ft 和 C 模式 100 ft 量化精度的高度报告, 会因为“粗量化”精度的存在导致线性跟踪器性能的劣化。为了有效改善高度跟踪器性能, TCAS II 使用了非线性跟踪器[6]。其原理将同一高度量化层内的所有数据点都作为高度变化率的单次观测, 而对高度率的估计通过对高度量化层占用时间的平滑滤波来完成。

假设当前高度为 $Nq + \varepsilon_0 q$, 其中 N 为整数且 $0 \leq \varepsilon_0 < 1$, ε_0 是飞机初始高度在量化精度为 $q = 100$ ft 的高度量化层的真实位置, 则飞机高度为

$$z(t) = Nq + \varepsilon_0 q + \dot{z}t \quad (3)$$

假设在同一时间间隔内高度变化率恒定, 飞机在一个高度量化层占用时间为

$$T = \frac{q}{|\dot{z}|} \quad (4)$$

则飞机高度变化率估计值为

$$\hat{\dot{z}} = d_i \frac{q}{\hat{T}} \quad (5)$$

式(5)中, d_i 表示最近的高度量化层跃变的符号(+1 表示高度增加, -1 表示高度降低)。飞机高度穿越连续两个高度量化层的时间差则作为高度量化层占用时间的测量值 T' , T' 的测量误差由采样率决定, 通过对连续的测量值 T 的平滑滤波得到当前高度量化层占用时间的估计值 \hat{T} , 最终得到当前高度率的估计值 $\hat{\dot{z}}$ 。

4. ACAS X 高度跟踪器

TCAS 系统的跟踪器旨在产生垂直速率的单点估计, 而 ACAS X 是在 TCAS II 的基础上升级的新一代机载防撞系统, 将飞机状态的步确定性考虑在内, 这样可以改善 TCAS 设计的局限性, 优化成本函数和决策逻辑, 大大提高防撞性能和降低报警率[7]。ACAS X 的跟踪器沿用了 TCAS 跟踪器的设计思路, 将复杂的三维空间目标跟踪问题分解为水平和垂直两个维度, 分别设计了水平跟踪器和垂直跟踪器。垂直跟踪器也称为高度跟踪器, 用于对目标飞机的高度和高度率进行状态估计。

在机载防撞系统 ACAS X 中, 主动监视模块通过 C/S 应答器获得关于目标飞机的高度、高度率等信息, 打包发送到高度跟踪器, 对接收到的信息进行滤波、预测[8], 最后形成关于目标飞机的垂直方向状态的准确估计, 为下一步防撞决策提供可靠信息[9][10]。

4.1. 高度跟踪器算法流程

机载防撞系统将接收到的目标飞机信息, 结合本机的位置、速度等信息进行数据关联、滤波、预测、更新等处理, 实现高精度快速估计飞机的飞行航迹, 为后续防撞决策提供可靠数据。对目标飞机垂直状态的跟踪, 本文将实时性良好的标准 Kalman 滤波算法与近似最小均方误差估计(MMSE)相结合[11], 应用于高度跟踪器中, 称为量化量测 Kalman 滤波方法。机载防撞系统 ACAS X 高度跟踪器的数据处理流程如图 1 所示, 其具体实现步骤如下:

Step 1: 建立目标飞机的运动模型, 得到目标飞机的状态方程和量测方程;

Step 2: 对目标飞机的初始状态和误差的协方差进行初始化;

Step 3: 使用 $k-1$ 时刻的估计值, 对 k 时刻目标的状态进行一步预测, 并计算一步预测误差的协方差;

Step 4: 由给出的系统模型中的变量及一步预测误差协方差, 计算 Kalman 增益;

- Step 5: 引入观测值、预测值以及量化区间, 使用 MMSE 状态估计算法;
- Step 6: 更新 k 时刻目标的状态估计, 并且更新 k 时刻状态误差的协方差。

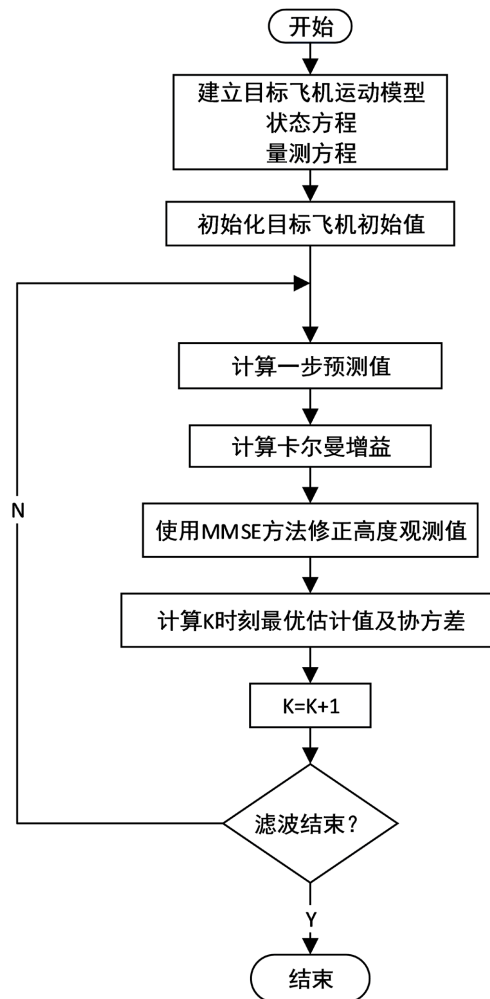


Figure 1. ACAS X height tracker data processing flow
图 1. ACAS X 高度跟踪器数据处理流程

步骤五在标准 Kalman 滤波算法的基础上, 增加了处理高度报告的量测量化部分, 可以使误差高度相关联, 再用 Kalman 滤波预测值修正目标飞机的高度观测值。相比于 TCAS II 中非线性滤波算法通过平滑占用时间估计高度率的方式, 本文给出的高度跟踪算法具有较好的准确性和可靠性。

4.2. 高度的量化量测 Kalman 状态估计

量化量测下目标跟踪最主要的目的是处理不精确类型的量测信息, 本文使用了量化量测中的近似最小均方差估计(MMSE)方法, 其思路就是通过分段估计的方法, 采用离散累计概率分布函数来近似连续概率密度函数的积分问题。

假设目标的先验概率为高斯分布, 利用高斯分布概率公式, 即 $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\delta^2}}$ 计算各分区中间点的概率密度, 用 d 表示概率分布的分。

$$d = \sum_{i=1}^L e^{-\frac{(g(i)-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

式中 μ 为高度观测值的均值, 取值为量测的一步预测值 $\hat{z}_{k|k-1}$; σ^2 为高度观测值的方差。

高度和高度率的近似最小均方误差估计(MMSE)步骤如下:

Step 1: 对高度的观测值 z 进行处理。将 k 时刻获得的高度观测值 z 进行分割, 量化量测值 z 对应的取值区间为: $\left[z - \frac{q}{2}, z + \frac{q}{2} \right]$, 把量化量测值进行分割就是将区间分为 L 个高度分区, 可求得每个分区的中点值为:

$$g(i) = z + \frac{1}{L} [(2i-1) - L] \frac{q}{2} \quad (7)$$

式中 $L = 20$, q 是量化步长, 对于 C 模式应答机 q 的取值为 100 ft, 对于气压高度计 q 的取值为 25 ft。

Step 2: 假设目标飞机的高度观测值落在每个分区的概率符合高斯分布, 利用高斯分布的概率公式, 求出落在每个分区中间点 $g(i)$ 的概率密度。在计算高斯分布的概率密度时, 采用量测的一步预测值及其预测误差的协方差, 作为高度观测值的均值和方差。

$$p(i) = \frac{1}{d} e^{-\frac{(g(i)-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

Step 3: 利用最小均方误差公式, 以及离散型随机变量的均值和方差公式, 计算每个分区的中心点 $g(i)$ 偏离高度估计值 \hat{z} 的均值和方差, 从而得到高度观测值的均值以及高度观测误差的方差。

高度观测值的均值:

$$z'_k = \sum_{i=1}^L p(i) [g(i) - \hat{z}_{k|k-1}] \quad (9)$$

高度观测误差的方差:

$$R'_k = E \left[(g(i) - \hat{z}_{k|k-1})^2 \right] - (E [g(i) - \hat{z}_{k|k-1}])^2 \quad (10)$$

式中 z'_k 是预测的 k 时刻的高度量测值, R'_k 是预测的 k 时刻高度量测误差的协方差。

5. 仿真结果分析

为了验证机载防撞系统 ACAS X 高度跟踪算法的效果, 本文根据 RTCA DO-385 标准, 飞机飞行在垂直方向上可分为: 平稳飞行、匀加速飞行和匀速飞行三种飞行状态, 据此设计了匀速飞行过程中使用 α - β 滤波、Kalman 滤波和量化量测 Kalman 滤波, 三种滤波方法进行仿真验证。

为了验证高度跟踪算法的正确性和有效性, 选取匀速运动模型, 仿真周期 T 为 1 s:

状态方程:

$$x_k = Fx_{k-1} + Gw_{k-1} \quad (11)$$

量测方程:

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (12)$$

式中状态 x_k 包含飞机的高度和高度率, z_k 为观测值, w_k 为状态噪声, v_k 为量测噪声, 都是零均值白噪声, 参考 ACAS X 性能标准, 方差分别是 $Q = 5 \text{ ft}^2/\text{s}^4$ 和 $R = 22.09 \text{ ft}^2$ 。状态转移矩阵 $F = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, 观测

矩阵 $H = [1 \ 0]$, 过程噪声耦合矩阵 $G = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}T^2 \\ T \end{bmatrix}$, 量化步长 q 可取 100 ft 和 25 ft。

1) 当高度报告为 25 ft 时, 三种滤波效果误差近似。为了仿真效果更明显, 按民航飞机飞行, 设定飞机初始化高度为 180 m 开始匀速上升飞行, 高度率为 200 m/s, 量化步长 $q = 100$ ft, 按照 4.1 小节高度跟踪器的处理流程, 得到经量化量测 Kalman 滤波处理后的高度轨迹如图 2 所示。

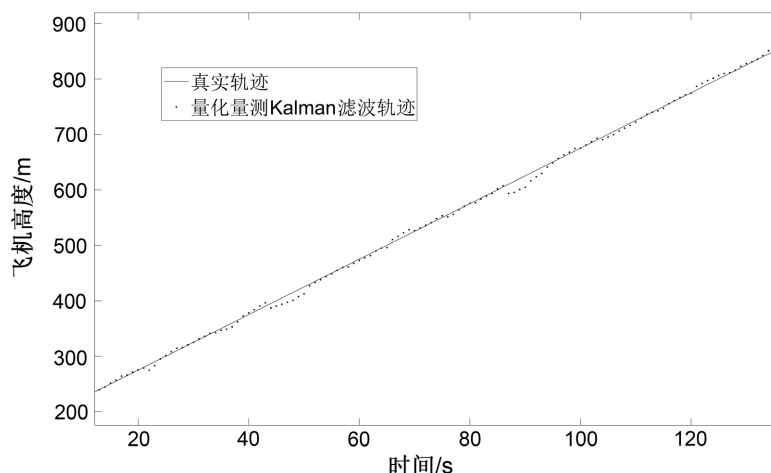


Figure 2. Quantitative measurement of Kalman filter simulation effect diagram
图 2. 量化量测 Kalman 滤波仿真效果图

2) C 模式下目标飞机的跟踪性能较差, 且估计的高度滤波存在振荡行为, 尤其在标准 Kalman 滤波中该行为影响较大。针对这一问题, 为了验证本文 4.1 小节所述方法的有效性, 使用同一条件仿真, 并将结果与标准 Kalman 滤波的结果对比。图 3 为量化量测 Kalman 滤波与标准 Kalman 滤波对高度估计误差的对比。

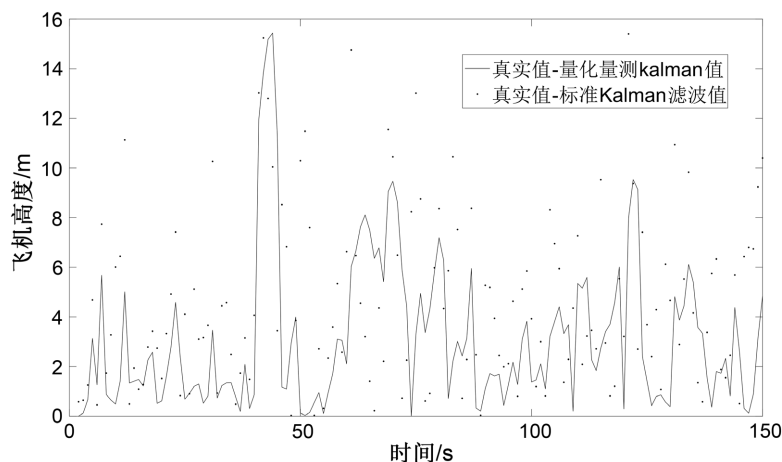


Figure 3. Quantized measurement Kalman filter and the standard Kalman filter error comparison diagram
图 3. 量化量测 Kalman 滤波与标准 Kalman 滤波误差对比图

3) TCAS 系统中 α 、 β 在仿真中分别设定值为 0.27 和 0.4, 此值满足系统稳定性要求, 且是在相同条件下滤波效果最好的取值。为了验证本文 4.1 小节所述方法的有效性, 使用同一条件仿真, 并将结果与 TCAS 系统中 α - β 滤波器的结果对比。图 4 为量化量测 Kalman 滤波与 α - β 滤波对高度估计的误差的对比。

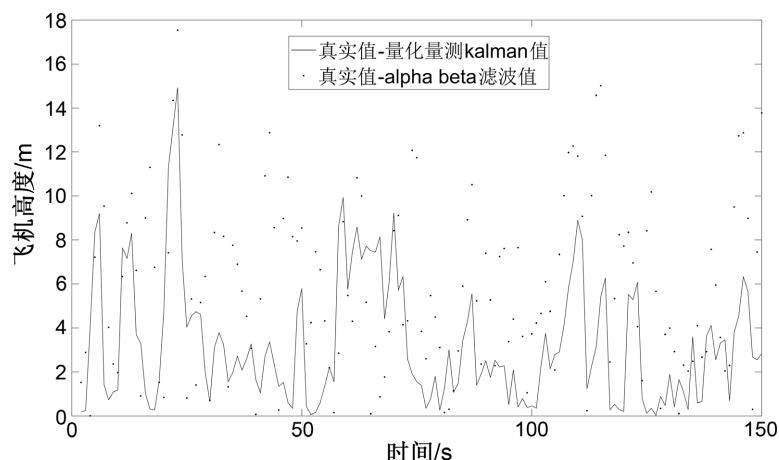


Figure 4. Quantified measurement of Kalman filter and α - β filter error comparison diagram
图 4. 量化量测 Kalman 滤波与 α - β 滤波误差对比图

6. 结束语

机载防撞系统 ACAS X 高度跟踪器是建立在标准 Kalman 滤波算法的框架上, 提出了一种近似最小均方误差(MMSE)状态估计算法。该算法保留了 Kalman 滤波良好的滤波性能, 进行更新状态值(飞机高度/高度率)之前, 先对飞机的高度观测值进行量化量测分区, 利用高斯分布的概率公式计算高度观测值落在每个分区的概率, 再使用 MMSE 状态估计算法计算每个分区对中心点的偏离度, 修正其观测值及方差。计算机仿真结果显示, 在仿真条件相同的情况下, 该方法对比于 TCAS 系统中的 α - β 跟踪算法和标准 Kalman 滤波算法, 对目标飞机的高度估计更加接近真实值, 特别是在 C 模式 100 ft 高度报告的情况下效果更明显, 减小滤波误差, 有效地减小高度量化对飞机跟踪的不确定性, 也解决了高度报告“粗量化”的特性, 可以为飞机防撞决策提供可靠的高度状态信息。本文仿真环境的设定均根据 RTCA DO-385 标准, 并未采用真实的飞行高度报告信息进行模拟, 下一步的工作将在获得真实高度报告后进行验证。

基金项目

西南民族大学 2021 年研究生“创新性科研项目”(项目编号 CX2021SP109)。

参考文献

- [1] (1980) Description of BCAS Altitude Tracker (Version VTRA 66). No. 42C-2020. MIT Lincoln Laboratory, Lexington, MA.
- [2] 林云松, 郝中豪, 彭良福, 等. 机载防撞系统非线性高度跟踪器的设计与实现[J]. 电讯技术, 2015, 55(5): 552-559.
- [3] Asmar, D.M., Kochenderfer, M.J., et al. (2013) Vertical State Estimation for Aircraft Collision Avoidance with Quantized Measurements. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, **36**, 1801-1806. <https://doi.org/10.2514/1.58938>
- [4] Gardner, R.W., Genin, D. and McDowell, R. (2016) Probabilistic Model Checking of the Next-Generation Airborne Collision Avoidance System. 2016 *IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, Sacramento, CA, 25-29 September 2016, 1-10. <https://doi.org/10.1109/DASC.2016.7777963>
- [5] 黄鹤, 张会生, 许家栋, 黄莺, 闫学斌. 一种改进的 α - β - γ 滤波跟踪算法[J]. 西北工业大学学报, 2008(2): 146-151.
- [6] RTCA (2018) Minimum Operational Performance Standards for Airborne Collision Avoidance System X (ACAS X) (ACAS Xa and ACAS Xo) Volume II, DO-385.
- [7] Priess, S., Weitz, L.A., Haissig, C.M., et al. (2020) TCAS II and ACAS Xa Traffic and Resolution Advisories during Interval Management Paired Approach Operations. 2020 *AIAA/IEEE 39th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, San Antonio, TX, 11-15 October 2020, 1-8. <https://doi.org/10.1109/DASC50938.2020.9256521>

- [8] 李铜波. 综合化防撞系统混合监视的设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [9] 张鸿麟. 基于 MDP 的通用航空机载防撞逻辑的设计[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [10] 杨秀玉. 基于 5G 移动通信的无人机与民用飞机防相撞技术研究[D]: [硕士学位论文]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2019.
- [11] 吴凡. 基于非线性滤波的机动目标跟踪算法研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.