

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.05.015

引用格式: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. [LIN Yunsong, HAO Zhonghao, PENG Liangfu, et al. Design and Implementation of Nonlinear Altitude Tracker for Traffic Collision Avoidance System[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(5): 552-559.]

机载防撞系统非线性高度跟踪器的设计与实现*

林云松¹, 郝中豪^{1,**}, 彭良福², 傅 勇³

(1. 电子科技大学 自动化工程学院, 成都 610054; 2. 西南民族大学 电气信息工程学院, 成都 610041;
3. 成都大学 电子信息工程学院, 成都 610106)

摘 要:高度跟踪器对于机载防撞系统(TCAS)能否可靠工作至关重要。传统的高度跟踪器采用线性 α - β 跟踪器,高度报告的“粗量化”精度将导致线性 α - β 跟踪器的性能劣化。为此,设计了一种对30 m量化精度高度报告的非线性跟踪器。核心思想是利用多次高度层穿越占用时间以及穿越高度层数来计算高度率,并将飞行过程划分为5个不同状态,不同状态采用不同高度率修正公式。仿真结果及误差分析显示非线性高度跟踪器在跟踪精度和响应时间两方面均优于线性 α - β 跟踪器,有效提高了TCAS做出防撞决策的可靠性。

关键词:机载防撞系统;高度跟踪器;非线性跟踪器;跟踪精度;响应时间

中图分类号:TN953 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)05-0552-08

Design and Implementation of Nonlinear Altitude Tracker for Traffic Collision Avoidance System

LIN Yunsong¹, HAO Zhonghao¹, PENG Liangfu², FU Yong³

(1. College of Automation, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;
2. College of Electrical Information Engineering, Southwest University for Nationalities, Chengdu 610041, China;
3. College of Electronic Information Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China)

Abstract: The altitude tracker is extremely important for reliable work of Traffic Collision Avoidance System (TCAS). Traditional altitude trackers use linear α - β trackers. The “rough quantization” accuracy of altitude report will lead to performance deterioration of linear α - β trackers. This paper designs a nonlinear altitude tracker to quantize the altitude report with 30 m (100 ft) accuracy. The key idea is to utilize the occupation time and the levels of the traversed altitude quantization to compute the altitude rate. Simultaneously, it divides the flight process into five states, each of which uses different correction formulas to calculate the altitude rate. Both the simulation results and error analysis demonstrate that the nonlinear altitude tracker improves the tracking precision and response time more evidently than linear α - β trackers, and provides high reliability for TCAS to make collision avoidance decisions.

Key words: TCAS; altitude tracker; nonlinear tracker; tracking precision; response time

* 收稿日期:2015-01-19;修回日期:2015-04-15 Received date:2015-01-19;Revised date:2015-04-15
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61374190);四川省教育厅科研项目(14ZA0323)
Foundation Item:The National Natural Science Foundation of China(No.61374190);Project Supported by Scientific Research Fund of Sichuan Provincial Education Department(14ZA0323)
** 通讯作者:hzhongh0408@qq.com Corresponding author:hzhongh0408@qq.com

1 引言

机载防撞系统 (Traffic Collision Avoidance System, TCAS) 对空中碰撞的检测以及选择适当的防撞机动主要依赖高度跟踪器对入侵飞机和本机的垂直高度率的精确跟踪和估计^[1]。TCAS 高度跟踪器的输入测量值是来自气压高度计的 30 m 量化 C 模式高度报告^[2]。真实环境中,即使保持平稳飞行,飞机也可能会在两个高度量化层之间发生“孤立”的跃变,这种情况跟踪器应该跟踪到飞机保持高度不变的真实意图,而如何抑制这种“虚假”高度变化同时又能跟踪到真实的高度变化情况则是高度跟踪的主要难点。由 RTCA(Radio Technical Commission for Aeronautics) 制定的《交通警告和防撞系统 II (TCASII) 机载设备最低工作性能标准 (DO-185B)》对高度跟踪提到采用线性 α - β 跟踪器和非线性高度跟踪器,但没有给出跟踪器的设计和实现方法。林肯实验室在 1980 年发表了关于线性 α - β 高度跟踪器的论文^[3]。线性 α - β 跟踪算法对所有的高度报告都应用 α - β 滤波器进行平滑处理,不对飞机的真实飞行意图进行任何判断,发生孤立高度层跃变时会导致高度率突变,即发生瞬态过冲现象。这种对高度率的错误估计将导致 CAS 逻辑做出不适当的防撞机动选择^[4]。虽然可以减少 α - β 跟踪器的跟踪增益(参数)以降低瞬态过冲,但同时也降低了跟踪器对实际高度率变化的跟踪能力。正是由于高度报告的“粗量化”精度导致了线性跟踪器的性能劣化。“粗量化”是指系统的速率满足任意两个连续的采样值的变化最多为 1 个量化等级。TCAS 的标称处理间隔为 1 s,对 30 m 高度报告来说 1800 m/min 以下的高度率跟踪都具有“粗量化”特性。

TCAS 对 30 m 量化精度的高度报告采用了一种非线性跟踪器。本文从 TCAS 系统对高度跟踪的需求出发,分析量化高度报告的特点,利用估计高度量化层占用时间间接估计高度率的基本思想建立高度率估计模型,在理想模型的基础上加入对特殊情况的处理。设计环节为对飞机真实意图进行判断,划分飞行过程为 5 个子状态。最后对飞行过程各种情况进行完整计算机仿真,对比分析非线性高度跟踪器同线性 α - β 跟踪器的跟踪性能差异。

2 TCAS 高度跟踪器的需求

2.1 高度和高度率的估计误差要求

在 TCAS 的应用中,对飞机的航迹进行准确预

测是至关重要的(例如预测最接近点 (Closest Point of Approach, CPA) 和垂直间隔距离 (Vertical Miss Distance, VMD))^[5]。飞机在垂直方向的运动模型是匀加速运动^[1],在垂直面上,TCAS 采用线性插值进行高度投影:

$$\hat{z}(t) = \hat{z}(0) + \hat{\dot{z}}(0)t. \tag{1}$$

式中, $\hat{z}(t)$ 是在 t 时刻的投影高度, $\hat{z}(0)$ 和 $\hat{\dot{z}}(0)$ 是在当前(设当前时刻为 0)的高度估计和高度率估计。假设在投影间隔期间高度率为常数,那么可由下式给出与式(1)相应的误差量:

$$e_z(t) = e_z(0) + e_{\dot{z}}(0)t. \tag{2}$$

可看出,由高度率估计误差带来的高度预测误差将随着投影时间的增大而增大,而高度估计误差对高度预测误差的影响则与投影时间无关。如果高度率的估计误差为 180 m/min,那么对 30 s 投影时间的高度预测误差则为 90 m。C 模式高度报告的量化单位是 $q = 30$ m,跟踪器的输入测量误差在 $-q/2 \sim q/2$ 之间,通过降低高度估计误差能最大降低的预测高度误差应小于等于 15 m。因此,高度跟踪误差并不是 TCAS 对高度跟踪器的关键需求,而高度率的跟踪误差才是影响 TCAS 预测高度误差的关键因素,其将对 TCAS 的冲突检测和分析咨询的正确性和有效性产生直接的影响^[4]。

2.2 量化高度报告的特性

假设飞机的定常高度率为 $\dot{z} > 0$,初始高度(当前高度)为 $Nq + \varepsilon_0 q$,其中 N 为整数且 $0 \leq \varepsilon_0 < 1$, ε_0 定义了飞机初始高度在量化精度为 $q = 30$ m 的高度量化层中的真实位置,那么飞机的高度可表示为

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

那么第 n 次采样的量化测量值

$$z^*(n\tau) = Nq + q \text{INT}(\varepsilon_0 + \frac{n\dot{z}\tau}{q}) = Nq + q \text{INT}(\varepsilon_0 + \frac{n\tau}{T}). \tag{4}$$

式中, $T = q/\dot{z}$ 表示了飞机高度 $z(t)$ 变化了一个量化高度层 q 所需要的时间,即量化层占用时间; τ 是采样时间间隔,TCAS 的采样间隔标称值为 1 s ($\tau = 1$ s); $\text{INT}(x)$ 为小于等于 x 的最大整数。从式(4)可看出,当采样点 n_k 发生第 k 次量化高度层穿越时应满足以下不等式:

$$\varepsilon_0 + n_k \frac{\tau}{T} \geq k > \varepsilon_0 + (n_k - 1) \frac{\tau}{T}. \tag{5}$$

定义 $R(x) = x - \text{INT}(x)$,即 $R(x)$ 表示当 $x > 0$ 时取 x 的小数部分, $0 \leq R(x) < 1$ 。求解式(5)得到

$$n_k = \frac{T}{\tau}(k - \varepsilon_0) + R\left(1 - R\left(\frac{T}{\tau}(k - \varepsilon_0)\right)\right) \quad (6)$$

用 T_k^* 表示观测到的飞机高度 $z(t)$ 在单个量化层中的占用时间,那么 T_k^* 与 n_k 有如下关系:

$$T_k^* = \tau(n_{k+1} - n_k), \quad k = 1, 2, 3, \cdots \quad (7)$$

从式(7)可看出,至少需要两次高度量化层的穿越才能得到第一个量化高度层占用时间的观测值。将式(6)代入式(7)可得

$$T_k^* = \begin{cases} \tau \text{INT}\left(\frac{T}{\tau}\right), & R\left((k - \varepsilon_0) \frac{T}{\tau}\right) < 1 - R\left(\frac{T}{\tau}\right) \\ \tau \text{INT}\left(\frac{T}{\tau}\right) + \tau, & R\left((k - \varepsilon_0) \frac{T}{\tau}\right) \geq 1 - R\left(\frac{T}{\tau}\right) \end{cases} \quad (8)$$

对于定常高度率的垂直飞行轨迹来说,根据式(8),量化高度层占用时间的观测值 T_k^* 的变化不会超过一个采样周期 τ 。因此,可以利用这个性质来进行垂直加速机动的检测条件。

3 非线性高度跟踪器的设计原理

3.1 高度率跟踪原理

非线性高度跟踪器的设计思想是通过估计高度量化层的占用时间来间接的估计目标的高度变化率^[6-8]。落在同一个高度量化层中的所有采样点(即相同的高度报告)都可视为对高度率的单个观测值,而对高度率的估计则是通过对高度量化层占用时间的平滑滤波来完成的。根据 2.2 中的定义,飞机高度 $z(t)$ 变化了一个量化高度层 q 所需要的真实时间是

$$T = \frac{q}{|\dot{z}|}, \quad (9)$$

那么,飞机的高度率的估计为

$$\hat{\dot{z}} = d_t \frac{q}{\hat{T}} \quad (10)$$

式中, d_t 表示最近的高度量化层跃变的符号(等于 +1 表示高度增加,等于 -1 表示高度降低)。飞机高度 $z(t)$ 穿越连续两个高度量化层的时间差则可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 $\hat{T}$,最终得到可靠的当前高度率估计值 $\hat{\dot{z}}$ 。

3.2 高度率的估计误差

高度量化层占用时间的观测值是采样周期的整

数倍,设第一次高度量化层跃变的观测时间为 t_0 ,此时飞机的真实高度为 $Nq + \varepsilon_0 q$,且 $0 \leq \varepsilon_0 < \tau/T < 1$ 。当飞机的高度率为 $\dot{z} > 0$ 时,第二次高度量化层跃变与第一次高度量化层跃变之间的高度差为(见图 1)

$$\dot{z} T_1^* = q + \varepsilon_1 q - \varepsilon_0 q \quad (11)$$

因此,

$$T_1^* = T(1 + \varepsilon_1 - \varepsilon_0) \quad (12)$$

那么,高度量化层占用时间观测值可表示为

$$T_j^* = T(1 + \varepsilon_j - \varepsilon_{j-1}) \quad (13)$$

对定常高度率输入模型,可通过 k 次观测的算数平均得到高度量化层占用时间 T 的估计:

$$\hat{T} = \frac{\sum_{j=1}^k T_j^*}{k} = T + T \frac{(\varepsilon_k - \varepsilon_0)}{k} \quad (14)$$

那么,高度量化层占用时间 T 的估计误差为

$$e_T = T \frac{(\varepsilon_k - \varepsilon_0)}{k} \quad (15)$$

由于 $0 \leq \varepsilon_j < \tau/T, j = 0, 1, 2, \cdots$, 则有

$$|e_T| \leq \frac{\tau}{k} \quad (16)$$

ε_k 与 ε_0 相互独立且均匀分布在区间 $[0, \tau/T]$ 上,故 $E(e_T) = 0$,对高度量化层占用时间 T 的估计是无偏的。

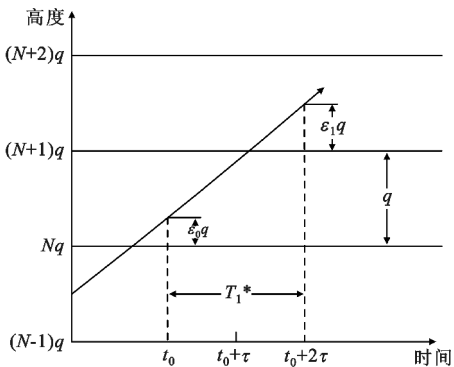


图 1 定常高度率的高度量化层跃变示意图
Fig. 1 Constant altitude rate flight process

3.3 高度量化层占用时间的平滑估计

当飞机的高度报告表示出存在有规律的高度量化层跃变并且跃变状态是连续且方向相同时,可采用以下递归平滑滤波方程对高度量化层占用时间进行估计:

$$\hat{T}_n = \hat{T}_{n-1} + \beta_n (T_n^* - \hat{T}_{n-1}) \quad (17)$$

式中, $\hat{T}_n$ 是当前高度量化层占用时间的估计值, $\hat{T}_{n-1}$ 是前一个高度量化层占用时间的估计值, T_n^* 是当前高度量化层占用时间的观测值, $\beta_n = 1/n, \hat{T}_0 = 0$ 。

3.4 高度报告无效时的高度量化层占用时间估计

在目标的跟踪过程中可能存在高度报告丢失或报告数据无效的情况,这种情况可能导致当前有效高度报告与之前最近一个有效高度报告之间的时间间隔内飞机可能会穿越了不止 1 个高度量化层。

对于这种情况,同样可以基于高度量化层占用时间的估计来对高度率进行跟踪。令 M 表示当前观测的最近两个高度层跃变时间间隔 τ^* 内穿越的高度量化层的数量,那么高度跟踪器可视为对 M 个单个高度量化层穿越的跟踪响应,其采样间隔是 τ^*/M 。因此,根据式(17)可得到

$$\hat{T}_n = \hat{T}_{n-1} + \beta_n (\tau^* - M \hat{T}_{n-1}). \quad (18)$$

式中, $\beta_n = 1/(n-1+M)$ 。令 $B_{n-1} = (n-1)$, $T_n^* = \tau^*/M$,则上式可改写为

$$\hat{T}_n = \hat{T}_{n-1} + \frac{M}{B_{n-1}+M} (T_n^* - \hat{T}_{n-1}) = \hat{T}_{n-1} + \frac{M}{B_n} (T_n^* - \hat{T}_{n-1}). \quad (19)$$

当 $M=1$ 时,上式与式(17)相同。注意, B_n 表示以最近的高度率穿越的高度量化层的数量。

3.5 高度量化层跃变逾期时的高度率估计

如果在预计的高度量化层跃变的时间范围内高度报告没有发生高度量化层的穿越,需要对高度率的估计进行修正。高度跟踪器根据高度量化层占用时间的观测值和估计值之差检测出这种逾期的跃变情况,对于第 j 次高度量化层穿越时,有

$$S_j = \hat{T}_{j-1} - T_j^*, \quad j=2,3,4,\dots \quad (20)$$

根据式(8),高度量化层占用时间的观测值 $\hat{T}_j$ 会有两个可能的取值 $\tau \text{INT}(T/\tau)$ 和 $\tau \text{INT}(T/\tau) + \tau$ 。而高度量化层占用时间的估计值 $\hat{T}_{j-1}$ 是对观测值的线性平均,因此 $\hat{T}_{j-1}$ 将落在宽度为 τ 的与观测值同样的范围内。因此,对于定常高度率来说,估计值和观测值的残差应满足

$$|S_j| \leq \tau. \quad (21)$$

根据上式可得出结论:如果当前的高度量化层占用时间(即从前一个高度量化层的穿越时间与当前的高度报告时间之差)大于等于 $\hat{T} + \tau$,则表明目标发生了高度减速机动。当跟踪器检测到减速机动时,TCAS 通常会假设飞机更有可能是从爬升或下降改为平飞,而不是转换到另一个高度率。定义 T^* 为上一次高度量化层穿越到当前高度报告(在同一个高度量化层)的时间,那么对同一个高度量化层定义

$$\Delta T = T^* - \hat{T}. \quad (22)$$

当 $\Delta T > 4.5 \text{ s}$ 时,表明飞机很有可能已改为平飞,应设置估计的高度率为零;当 $\Delta T \leq 0.5 \text{ s}$ 时则表示尚未到达高度量化层跃变的逾期时间,并用已估计的高度率更新当前的高度估计值;当 $0.5 \text{ s} < \Delta T \leq 4.5 \text{ s}$ 时,表示高度量化层跃变逾期但还不能判定为平飞,需根据当前的高度量化层占用时间 T^* 更新高度率的估计值。非线性高度跟踪器采用以下经验公式对当前高度率进行修正:

$$\hat{z} = d_i \frac{q}{(T^* + \tau)} \frac{(4.5 + \tau/2 - \Delta T)}{(4.5 + \tau/2)}. \quad (23)$$

3.6 对高度量化层跃变的一致性检测

通过估计高度量化层的占用时间来间接的估计目标的高度变化率的设计思想是建立在定常高度率输入模型基础上的,对于非定常高度率的跟踪,高度跟踪器检测之前对高度率的估计是否与当前的高度量化层占用时间的观测值一致,如果不一致则表明目标发生了加速机动,之前对高度率的估计会有较大误差,这时需重新确定目标的高度量化层跃变状态或增加跟踪器的增益。

3.6.1 符号一致性

飞机真实高度率的方向应和高度量化层的跃变方向 d_i 相同,非线性高度跟踪器对每个高度报告都要进行符号一致性检查。一旦检测到高度量化层跃变的符号与之前的高度率估计的符号不一致(即相反)时,立即重新确定目标的高度量化层跃变状态。

3.6.2 高度量化层跃变的一致性

每个跟踪周期非线性高度跟踪器采用下式计算高度量化层占用时间的残差:

$$|S_j| = |\hat{T}_{j-1} - T_j^*|. \quad (24)$$

如果 $|S_j|$ 大于 1.5 s 则表示飞机发生了加速机动,应减缓或终止跟踪器增益的降低过程。根据式(19),对高度量化层占用时间的平滑估计设计如下:

(1) 如果 $T_n^* > 2.5 \text{ s}$, 设 $B_n = M$, 滤波增益为 1;

(2) 如果 $T_n^* \leq 2.5 \text{ s}$, 设 $B_n = M+1$, 滤波增益小于 1, 其最小值为 0.5。

如果 $|S_j|$ 小于 1.5 s ,则需要计算高度量化层跃变的加权累计残差。

3.6.3 高度量化层跃变的累计残差

基于定常高度率的累计残差趋于零,累计残差可检测出单次跟踪周期内不能检测的加速机动,

TCAS 非线性高度跟踪器采用以下公式计算高度量化层跃变的加权累计残差:

$$\bar{S}_j=\gamma\bar{S}_{j-1}+S_j。 \tag{25}$$

式中,加权系数 $\gamma=0.8$ 。如果 $|\bar{S}_j|>1.35$ s则表示飞机发生了加速机动,按与 3.6.2 节中相同的方法调整滤波增益并估计当前的高度量化层占用时间;如果 $|\bar{S}_j|\leq 1.35$ s,则表示飞机目前没有发生加速机动,可以按以下方法减小滤波增益:

(1) 如果 $T_n^*>8.5$ s,则 $B_n=1$,由式(19)估计当前的高度量化层占用时间为

$$\hat{T}_n=MT_n^*-(M-1)\hat{T}_{n-1}=\tau^*-(M-1)\hat{T}_{n-1};$$

(2) 如果 $T_n^*\leq 8.5$ s,则 $B_n=\text{MIN}(\text{MIN}(8,\text{INT}(17/T_n^*)),B_{n-1}+M)$,然后由式(19)估计当前的高度量化层占用时间(即 B_n 的最大值为 8)。

4 非线性高度跟踪器的实现

4.1 飞行状态转换模型

TCAS 非线性高度跟踪器在设计实现中需要对每个被跟踪的飞机根据其高度报告来确定 30 m 量化精度的高度量化层的跃变状态,该跃变状态由 5 个子状态构成,见图 2。

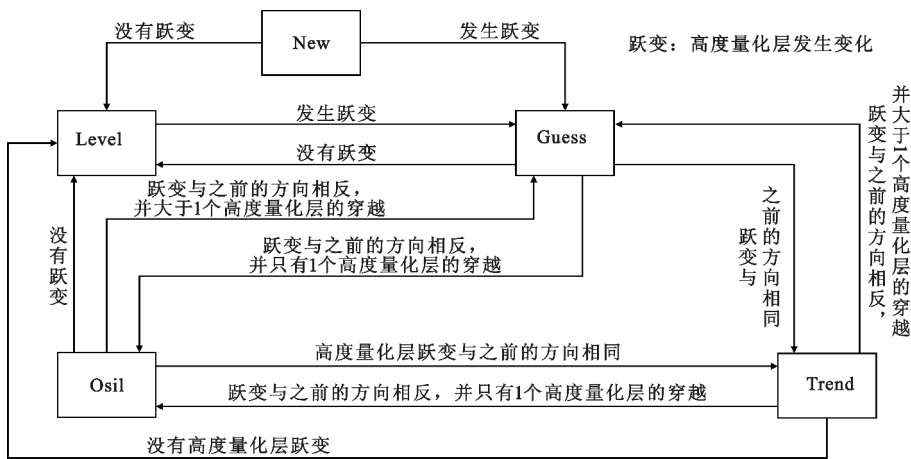


图 2 非线性高度跟踪器的状态转换
Fig. 2 States transition chart of nonlinear altitude tracker

对于被跟踪的目标其高度跃变状态反映了跟踪高度和高度率的可靠度。高度跟踪器初始化时,跃变状态要么是“New”(初始航迹),要么是“Trend”(如果目标存在一个已知的有意义的高度率)。当目标的高度报告表示出存在有规律的高度量化层跃变并且跃变状态是连续且方向相同时,被跟踪目标被赋予“Trend”状态。如果预期的空间跃变很晚才发生,则目标将从“Trend”转换到“Level”。“Level”表示高度变化率为零,对于长时间未发生空间高度跃变的目标应处于“Level”状态。仅在两个连续的高度量化层之间来回振荡(颠簸)的高度报告,将表明目标是在水平飞行时的振荡状态“Oscil”。当收到的高度报告显示目标在方向 and 高度量化层的数量上发生了未曾期望的跃变时,目标将处于“Guess”状态。当目标在“Trend”状态时,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。在每个跟踪周期中,每个目标只能被分配唯一的一个状态,并根据目标的当前状态确定如何使用高度报告来更

新高度率的估计值。

4.2 非线性高度跟踪器的总体处理流程

在非线性高度跟踪器的每个处理周期中,首先检查当前高度报告的有效性,如果当前高度报告无效,则根据目标飞机之前的高度和高度率估计值对目标进行高度记忆跟踪;如果高度报告有效,则进行以下处理(具体流程如图 3 所示):

(1) 计算当前高度报告与上一次可信的高度报告之差 Δz ,根据目标飞机之前估计的高度和高度率计算可信度窗口,如果 Δz 落在可信窗口内则表示当前的高度报告可信;否则当前高度报告不可信,并对目标进行高度记忆跟踪;

(2) 如果当前高度报告可信,则根据 Δz 来判断目标在本次处理周期前是否发生了高度跃变;如果 Δz 不等于零,表示目标发生了高度量化层跃变,需进行高度量化层跃变的更新处理;如果 Δz 等于零,则表示目标尚未发生高度量化层跃变,则进行高度量化层无跃变的跟踪;

(3)对于导致非预期高度量化层跃变的可信高度报告,还要判断它是否是一个虚假振荡报告,如果不是虚假振荡报告,则保存高度报告时间 t_c ;

(4)当完成了对不可信报告的记忆跟踪或对可信报告的非线性跟踪后,都要保存高度跟踪更新的时间 t_u 。

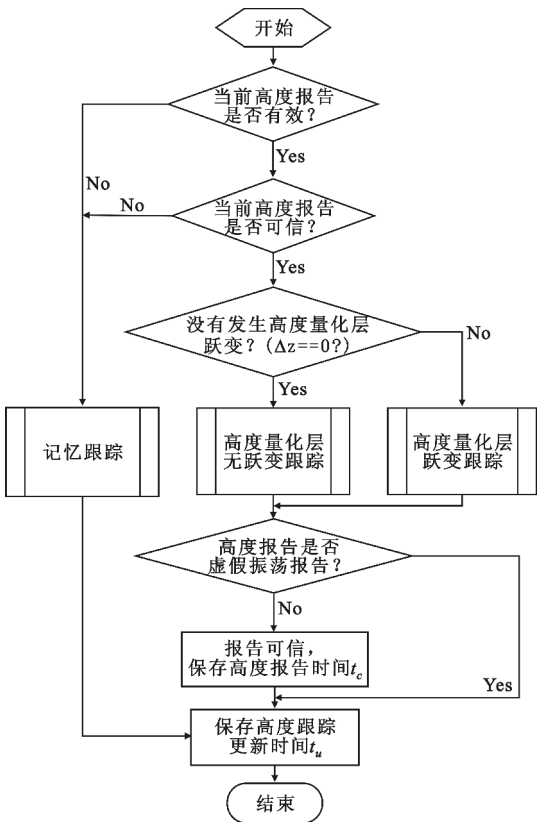


图 3 非线性高度跟踪器总体流程
Fig. 3 Flow chart of nonlinear altitude tracker

非线性高度跟踪器主要由记忆跟踪、高度量化层无跃变跟踪和高度量化层跃变跟踪 3 个模块组成。记忆跟踪并不改变目标的高度量化层跃变状态,而当接收到可信的高度报告时首先进行高度量化层跃变状态的一致性检测(高度量化层跃变跟踪)或高度量化层跃变逾期检测(高度量化层无跃变跟踪),确定目标在当前跟踪周期的高度量化层跃变状态,然后根据目标的当前状态确定如何使用高度报告来更新高度率的估计值。非线性高度跟踪器的主要特性如下:

- (1)高度跟踪器初始化时,跃变状态要么是“New”,要么是“Trend”(如果目标存在一个已知的有意义的高度率);
- (2)目标在“Level”或“New”状态下发生第一次

高度量化层跃变时转变到“Guess”状态,高度率的初始估计值为144 m/min,并且高度率在之后连续的无高度量化层跃变的跟踪周期中以 10% 衰减;

(3)目标在“Guess”或“Oscil”状态下如果发生了第二次高度量化层跃变且跃变符号与前一次跃变的一致,则转变到“Trend”状态,高度量化层占用时间估计值 $\hat{t}$ 的初始值等于高度量化层占用时间的观测值,并由式(10)得到当前高度率的估计值;

(4)对后续满足一致性检测的高度量化层跃变都基于高度量化层占用时间的平滑滤波来间接估计目标的高度率;

(5)当目标在“Trend”状态时,如果检测到高度量化层跃变逾期,根据 3.5 小节更新高度率信息;

(6)对于任何状态,只要检测到高度量化层跃变的符号不一致且穿越的高度量化层数大于 1,则立即转变到“Guess”状态;

(7)当目标在“Guess”或“Oscil”或“Trend”状态时如果检测到高度量化层跃变的符号不一致且穿越的高度量化层数等于 1,则立即转变到“Oscil”状态(对“Trend”状态应检测虚假振荡报告);当目标不是“Level”状态时,当目标高度处于同一个高度量化层的时间超过 20.5 s,则立即转变到“Level”状态。

5 非线性高度跟踪器的计算机仿真

5.1 仿真环境设定

根据 DO-185B,飞机飞行过程中为保证安全在垂直方向分为 3 种飞行状态:平稳飞行、匀加速度飞行、匀速飞行。据此设计两种情况进行仿真:平稳飞行过程中高度报告应为恒定值,由于可能存在的颠簸导致高度报告发生“孤立”跃变的情况;由平稳飞行进入匀加速飞行,再由匀速飞行进入匀减速飞行直至平稳飞行。

仿真利用 Matlab 对线性 α - β 跟踪器和非线性高度跟踪器跟踪结果进行对比,TCAS 中 α - β 跟踪器设定 $\alpha=0.4, \beta=0.05$ 。为方便描述,设定飞机初始高度报告为 300 m,该值可以任意设定。根据 DO-185B,飞机加速度一般在 1~2.5 m/s²之间,仿真以 2.5 m/s²加速度进行。

5.2 仿真结果

5.2.1 平稳飞行发生“孤立”高度层跃变

图 4 中, t 在 0~9 s 平稳飞行; $t=10$ s 时刻,高度报告由 300 m 变化到 330 m; $t=11$ s 高度报告恢复

300 m 并保持稳定。根据之前的分析,这种情况是由于气压高度计测量的“粗量化”性质所引起的,属于正常的随机扰动,飞机真实高度率恒为 0。仿真结果显示非线性高度跟踪器仅在 $t = 10\text{ s}$ 错误跟踪高度率,线性 $\alpha\text{-}\beta$ 跟踪器在 $t = 30\text{ s}$ 后趋于稳定。

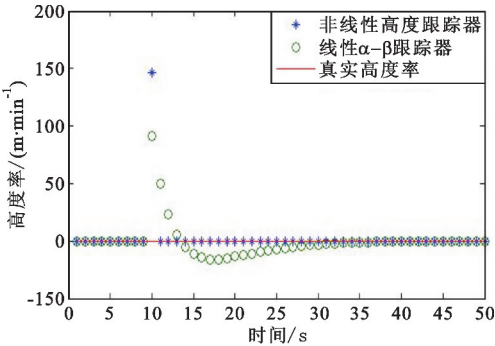


图 4 孤立高度层跃变的高度率跟踪

Fig.4 Altitude rate track of isolate altitude quantization jump

5.2.2 匀加速度过程

图 5 中,飞机加速的目标高度率为 240 m/min,加速开始的一段时间内,非线性跟踪器和线性 $\alpha\text{-}\beta$ 跟踪器对高度率的跟踪均有一定的延迟, t 在 27 ~ 58 s 期间,跟踪均趋于稳定,其中非线性高度跟踪器平均误差为 7 m/min,线性 $\alpha\text{-}\beta$ 跟踪器平均误差为 31 m/min,且有明显波动。减速阶段, $t = 69\text{ s}$ 时非线性高度跟踪器达到稳定,线性 $\alpha\text{-}\beta$ 跟踪器在 $t = 80\text{ s}$ 之后趋于稳定。对于其他高度率的仿真与图 5 类似,本文略去。

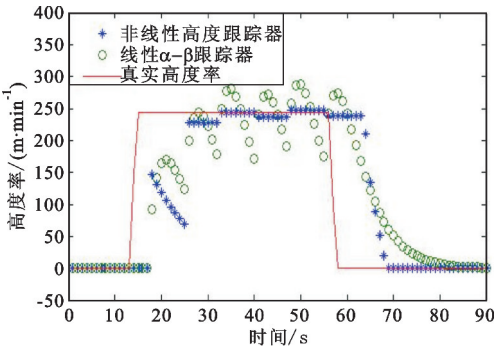


图 5 目标高度率 240 m/min 高度率跟踪

Fig.5 Altitude rate track of 240 m/min target

5.3 误差分析

图 6 横坐标对应不同目标高度率,纵坐标显示跟踪误差超过 180 m/min 的跟踪点的个数,飞行过程同 5.2.2 节所述。随着目标高度率的增加,非线性高度跟踪器出现超过 180 m/min 误差跟踪点的个数少于线性 $\alpha\text{-}\beta$ 跟踪器。

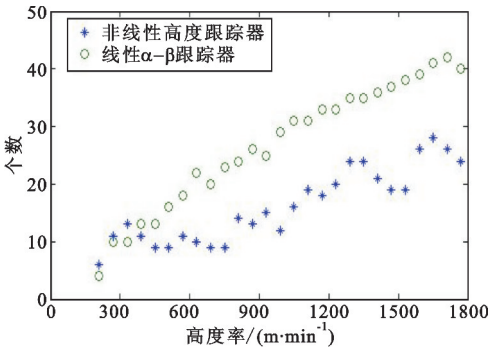


图 6 跟踪误差大于 180 m/min 的跟踪点个数统计图

Fig.6 Statistical chart of track error greater than 180 m/min

6 结束语

TCAS 高度跟踪器的设计中,由于高度报告“粗量化”的特性,线性 $\alpha\text{-}\beta$ 跟踪器对孤立高度层跃变情况会发生高度率跟踪错误,对于匀速及匀加速度过程的跟踪也具有较大均方误差。仿真结果显示非线性高度跟踪器在孤立高度层跃变情况中可以更快达到稳定跟踪,在匀加速度和匀速过程中均有较小均方误差,同时发生超过 180 m/min 误差的统计个数也少于线性 $\alpha\text{-}\beta$ 跟踪器,对飞机飞行过程各种情况的跟踪性能均优于线性 $\alpha\text{-}\beta$ 跟踪器,可以有效提高 TCAS 系统防撞决策的可靠性。

本文中所述仿真环境设定均根据 DO-185B 规定进行模拟,并未采用真实的飞行高度报告信息,进一步验证工作可以在获得真实高度报告后进行。

参考文献:

[1] 彭良福,林云松. 机载防撞系统垂直防撞的物理模型 [J]. 电讯技术,2010,50(8): 7-11.
PENG Liangfu, LIN Yunsong. Physical Model for Vertical Collision Avoidance in Traffic Alert and Collision Avoidance System (TCAS) [J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(8): 7-11. (in Chinese)

[2] RTCA DO-185B. Minimum Operational Performance Standards for Traffic Alert and Collision Avoidance System II (TCAS II) [S].

[3] Andrews J. Description of BCAS Altitude Tracker (Version VTRA 66) [R]//No. 42C-2020. Lexington, MA: MIT Lincoln Laboratory, 1980.

[4] Munoz C, Narkawicz A, Chamberlain J. A TCAS-II Resolution Advisory Detection Algorithm [C]//Proceedings of 2013 AIAA Guidance, Navigation and Control Conference. Boston, USA: IEEE, 2013: 1-5.

[5] 林云松,彭良福,童玲. 空中防撞系统避撞机制的数学模型 [J]. 电子科技大学学报, 2008, 37(4): 552-555.
LIN Yunsong, PENG Liangfu, TONG Ling. Mathematics

model for collision avoidance in traffic alert and collision avoidance system[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2008, 37 (4): 552 - 555. (in Chinese)

- [6] 吴凡. 基于非线性滤波的机动目标跟踪算法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2010.

WU Fan. Research of Maneuvering Target Tracking Algorithm Based on Nonlinear Filtering[D]. Xi'an: Xidian University, 2010. (in Chinese)

- [7] Baek K, Bang H. ADS-B based Trajectory Prediction and Conflict Detection for Air Traffic Management[J]. International Journal of Aeronautical & Space Science, 2012, 13(3): 376-385.

- [8] Roy K, Benjamin L, Claire T. Target tracking and Estimated Time of Arrival (ETA) Prediction for Arrival Aircraft[C]//Proceedings of 2006 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Colorado: IEEE, 2006: 1-5.

作者简介:



林云松(1969—),男,四川成都人,1999年于电子科技大学获博士学位,现为副教授,主要从事机载防撞系统、自动控制理论及工程应用方面的研究;

LIN Yunsong was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1969. He received the Ph. D. degree from University of Electronic Science and

Technology of China in 1999. He is now an associate professor. His research concerns TCAS system, automatic control theory and its engineering application.

Email: yslin384@163.com

郝中豪(1991—),男,山西晋中人,硕士研究生,主要研究方向为智能信息处理与控制;

HAO Zhonghao was born in Jinzhong, Shanxi Province, in 1991. He is now a graduate student. His research concerns intelligent information processing and control.

Email: hzhongh0408@qq.com

彭良福(1966—),男,四川成都人,1994年于电子科技大学获博士学位,现为教授,主要从事机载防撞系统、信号与信息处理方面的研究;

PENG Liangfu was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1966. He received the Ph. D. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 1994. He is now a professor. His research concerns TCAS system, signal and information processing.

Email: pengliangfu@126.com

傅勇(1972—),男,重庆万州人,1993年于华东师范大学获学士学位,现为高级工程师,主要从事机载防撞系统、雷达信号处理等方面的研究。

FU Yong was born in Wanzhou, Chongqing, in 1972. He received the B. S. degree from East China Normal University in 1993. He is now a senior engineer. His research concerns TCAS system and radar data processing.