doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.07.007

基于数据链的无人机空中自动防撞技术*

严 雯[1,**],王洪涛[1],卿 利[1],梁桃红[2]

(1.中国西南电子技术研究所,成都 610036;2.空军司令部 信息化部,北京 100843)

摘 要:分析了一种基于数据链的自动空中防撞技术,从空中自动防撞系统需求出发,描述了系统基本工作原理和流程。采用二次曲线拟合方法,给出了最优控制数学模型,以求解无人机航路间的最小距离,实现最优机动操作组合。仿真分析结果表明,空中自动防撞系统可在碰撞发生前的最后时刻有效完成逃逸操作,避免发生飞行碰撞,可为无人机编队提供进近飞行的安全防护。

关键词:无人机;自动空中防撞系统;数据链;最优逃避

中图分类号:V249;TP273 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-893X(2013)07-0859-05

Auto-ACAS for UAV Based on Data Link

YAN Wen[1], WANG Hong-tao[1], QING Li[1], LIANG Tao-hong[2]

(1. Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China;
2. Information Department of Air Force Headquarter, Beijing 100843, China)

Abstract: A method of an automatic air collision avoidance system (ACAS) based on data link is presented in this paper. According to the basic requirements on the Auto-ACAS, the working principle and flow of the system are analyzed. The mathematical model of optimal escape is given by curve fitting both the flight path of two Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) with quadratic curves as a function of time, and by finding the analytic solution to the minimum separation distance between two curves. The simulation results indicate that the Auto-ACAS can provide mid-air approaching collision protection for UAVs at the last moment.

Key words: UAV; auto-ACAS; data link; optimal escape

1 引 言

自动空中防撞系统(Auto-ACAS)旨在防止中空空域的飞机之间的碰撞问题。与传统的民航机载防撞系统(TCAS)[1]不同,Auto-ACAS 是一套独立运行的飞机自动防撞系统,可以在 TCAS 手动防撞机动措施失败的情况下,在两架飞机碰撞前的最后瞬间实现自动防撞。

美空军研究实验室(AFRL)最初与瑞典空军联合完成自动防撞地系统(Auto GCAS)研究[2]。在此基础上,美空军启动"飞行员危险降低"项目,由波音公司、洛克希德·马丁公司和萨博公司联合开展 Auto-ACAS 系统研制[3]。该项目分成两个阶段,2001 年完成概念研究,2003 年完成飞行测试。据公开资料显示,2006 年,美空军在 F-16 飞机上完成了飞行测试,正在进行 F-22 和 F-35 装备该系统的风险评估。

在无人机上发展自动防撞技术的主要驱动来自于两个方面,一是多架无人机在同空域自主飞行,二是多架无人机与有人飞机编队飞行[4]。由于地面人员对无人机实施完全无误的防撞操作非常困难,研究基于数据链的空中自动防撞技术具有重要意义[5]。

本文分析了无人机空中飞行面临的主要问题和自动防撞需求,给出了系统工作原理,并提出了实现最优逃避机动的优化控制模型,最后给出了系统的仿真分析结果。

* 收稿日期:2013-03-02;修回日期:2013-04-23 Received date:2013-03-02;Revised date:2013-04-23
** 通讯作者:yanwen9@126.com Corresponding author: yanwen9@126.com

2 问题描述

2.1 防撞逃逸操作时机

飞机隔离区域可以视为一个球形空间,要求防止任何其他飞机穿越该隔离球体,才能保证飞行的安全性[2,5-7]。逃逸时间(Time to Escape)为飞机任何操作都无法避免碰撞的剩余时间,如图 1 所示,定义0 s为发生碰撞的时间,而1.5 s和25 s为两种典型的逃逸时间。在0 s逃逸时间,做任何操作都无法避免碰撞的发生;在1.5 s逃逸时间,可在最后瞬间避免发生碰撞;在25 s逃逸时间,可避免发生航线的冲突。

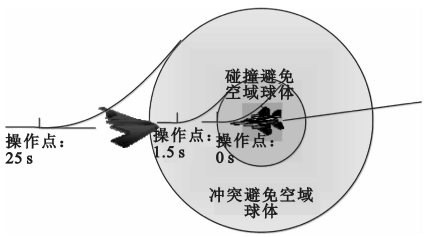

图 1 逃逸时间

Fig.1 Time to escape

通常情况下,TCAS 系统在 25~45 s逃逸时间产生空中交通警告与咨询报告,自动防撞系统假定在 TCAS 操作失败后,提供最后一次的自动碰撞避让操作。

2.2 自动防撞需求分析

对自动防撞系统的主要需求包括以下几个方面:

(1)提供防止与其他飞机碰撞的最后紧急自动操作手段,期望的逃逸操作时间应在 0.5~1.5 s内;

(2)系统防止碰撞的操作不能干扰正常的飞机控制;

(3)能够提供预先的防撞操作响应;

(4)自动逃逸操作指令产生时间足够飞机实现碰撞避让,并且应建立起终止规则;

(5)对不可预知事件引起的碰撞威胁,实施类似于飞行员的规避操作能力;

(6)系统应是可保证安全的飞机操作,具有可验证、测试的冗余设计能力;

(7)可容忍瞬时 GPS 或数据链丢失;

(8)系统可同时设计在有人机和无人机上使用。

自动防撞要求所有飞机都能实时获取精确态势信息。这种信息可通过两种方式获得:传感器和数据链。传感器如雷达、激光等受限于视场范围和高成本;数据链非常适合小规模编队飞行时的态势感知要求。因此,基于数据链技术,设计一种独立于 TCAS 的自动防撞系统是必要的。

3 系统工作原理

3.1 基本原理

Auto-ACAS 基于数据链完成多机间的自动防撞操作,一旦触发操作则抛弃飞行员的操作指令。其基本原理如图 2 所示。

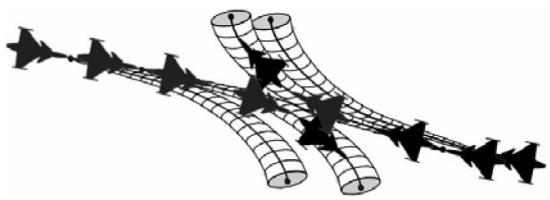

图 2 自动防撞操作示意

Fig.2 Illustration of automatic collision avoidance for two aircrafts

每架飞机连续计算滚转角和过载因子,并计算最优飞行路线。飞行路线是一种锥形区域,其大小依赖于所预测飞行路线的不确定性,该区域随时间而增加。飞行路线通过数据链发送到其他飞机,以预订对该线路空域的占用。其他飞机收到该飞行路线后,与自身飞行路线进行比较,如果判定将发生碰撞(即两架飞机的飞行线路交叉),则触发自主逃逸飞行操作;如果逃逸飞行中没有探测到碰撞可能,则计算和发送新的飞行路线给其他飞机。

Auto-ACAS 系统的基本功能结构如图 3 所示。其中,计算单元用于计算滚转角(EA)、过载因子(NZ)和飞行线路;数据链收发机用于接收其他飞机飞行线路,并发送自身飞行线路;存储器用于存储滚转角、过载因子和飞行线路等计算结果;防撞操作单元利用自身飞行线路和从其他飞机接收的飞行线路信息,探测可能发生的碰撞,并触发避让操作;飞行补偿单元用于在避让操作中,基于飞机当前位置信息 CP、飞行路线和避让操作指令,计算补偿飞行的数据。

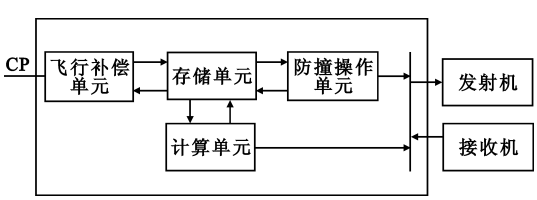

图 3 系统功能结构框图

Fig.3 Illustration of function framework

3.2 系统流程

Auto-ACAS 中,自动防撞操作算法的操作流程如图 4 所示。

(1)计算滚转角(EA)、过载因子(NZ)和飞行线路(FAP),并保存;

(2)将 FAP 通过数据链发送给其他飞机,以预订飞行线路;

(3)接收其他飞机的飞行线路信息,检测与自身的飞行线路是否发生碰撞;

(4)如果检测到可能发生碰撞,则触发避让操作;

(5)在避让操作中,对滚转角(EA)、过载因子(NZ)进行调整如下:基于当前位置 CP(t_0)、滚转角(EA)和过载因子(NZ),估计时间($t_0+\Delta t$)时飞机位置 CP($t_0+\Delta t$);计算($t_0+\Delta t$)时从 FAP 计算的位置 PP($t_0+\Delta t$)与 CP($t_0+\Delta t$)的误差,得到需要补偿的滚转角 ΔEA 和过载因子 ΔNZ;

(6)从补偿的滚转角 ΔEA 和过载因子 ΔNZ 计算新的飞行操作指令。

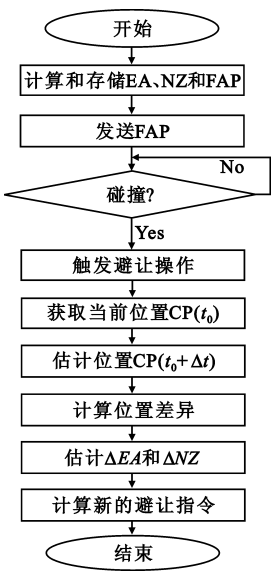

图 4　防撞操作流程

Fig.4 The working flow of auto-ACAS

4　最优逃避动机选择

4.1　逃避机动措施

飞机通常采取垂直方向、水平方向,或者垂直和水平方向组合的机动措施来避免碰撞。可能的逃避机动措施包括拉升、向左滚转并拉升和向右滚转并拉升 3 种。

在两架飞机做逃避机动时,将产生 9 种可能的机动方式组合,需要从中选择最优的措施。从原理上,对各种机动操作组合,需要计算两架飞机飞行线路之间最小间隔,其中具有最小间隔值最大的机动操作组合应为最优。

4.2　优化控制模型

本机与入侵飞机间的最小距离可通过曲线拟合并求解最优解方式得到。下面以单个入侵飞机为例,提出实现最优解的方法。

采用二次曲线拟合法,提取两架飞机 t s 内 3 个点(如0s、3 s和6 s时刻)的位置数据,则可得到 t s(如 6 s)内飞机 1 和飞机 2 的飞行路径解析式:

$$P_m = A_m t^2 + B_m t + C_m \tag{1}$$

$$P_n = A_n t^2 + B_n t + C_n \tag{2}$$

两架飞机之间的间隔距离 $J(t)$ 可表示为向量 P_m 和 P_n 的范数:

$$J(t) = \| (A_m - A_n)t^2 + (B_m - B_n)t^2 + (C_m - C_n)t^2 \| \tag{3}$$

整个飞行轨道拟合过程如图 5 所示。

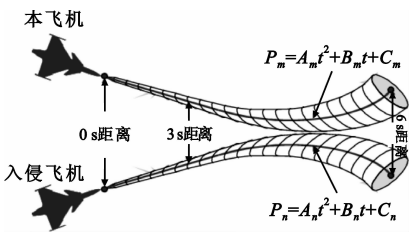

图 5　飞行轨迹拟合

Fig.5 Quadratic curve fitting along the trajectory of escape maneuver

令

$$\mathrm{d}/\mathrm{d}t \| (A_m - A_n)t^2 + (B_m - B_n)t^2 + (C_m - C_n)t^2 \| = 0$$

即可求出当本机与其他飞机飞行轨迹之间的间隔距离最小值时所对应的时刻 t_F,最接近点的间隔距离就为 $J(t_F)$。

5　仿真分析

文献[8]对 AUTO-ACAS 算法进行了仿真分析。仿真参数的选择以典型作战类飞机性能为参考,主要包括:飞机翼展为8 m,飞行高度为4 000 m,位置误差为24 m。假定飞机可允许的最大滚转角为 150 °/s,最大过载为5.5g。

仿真内容针对易发生碰撞的 3 种场景,包括迎头飞行、垂直飞行和追逐飞行。每种场景给出 3 组参数的仿真结果。

参数组 1:倾角和逃逸角,前者表示飞机飞行轨迹与水平面的角度;后者角表示算法启动后,两架飞机之间的飞行角度。

参数组 2:距离(distance)和最小距离(MinSSD),前者表示两架飞机之间的实际距离;后者表示所声

明空间的最小距离。

参数组 3：最小距离时间（Tmin）和剩余时间（TMR），前者表示两架飞机所声明空间的最小距离发生时的时间；后者表示到激发自动防撞算法所剩余的时间。

仿真结果表明：空中自动防撞算法可以有效完成逃逸操作，避免发生飞行碰撞。

5.1 迎面飞行仿真

在如图 6 所示的仿真场景下，两架飞机分别以 0.8 Mach的飞行速度迎头飞行。

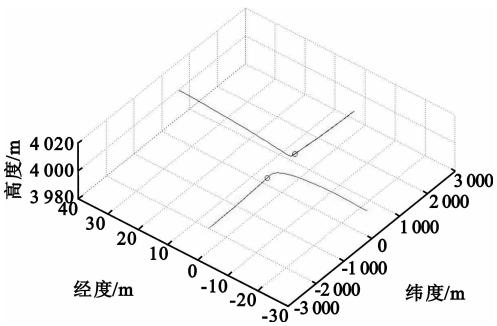

图 6 迎面飞行仿真场景

Fig.6 Aircraft traces during head-on scenario

仿真结果如图 7 所示，左边 2 幅图表示两架飞机（AC1 和 AC2）倾角和逃逸角随时间变化情况，右上图表示距离（distance）和最小距离（MinSSD）随时间变化情况，右下图表示最小距离时间（Tmin）和剩余时间（TMR）随时间的变化情况（下同）。

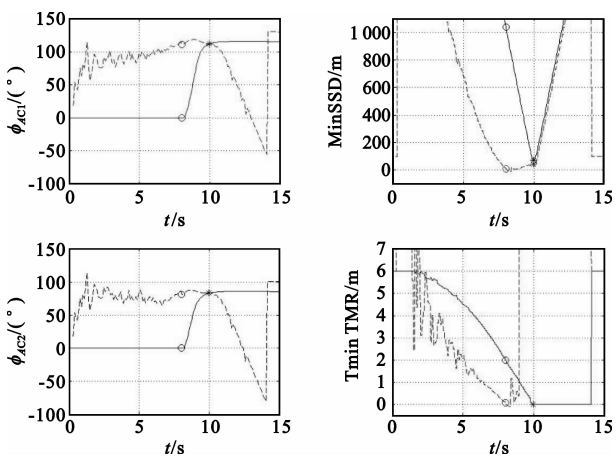

图 7 迎面飞行场景仿真结果

Fig.7 Simulation results under the head-on scenario

仿真结果表明：逃逸操作在两架飞机相距为 1 050 m时执行，持续时间为 2 s，飞机 1 做滚转 +110°操作，飞机 2 做滚转 +84°操作。

5.2 垂直飞行仿真

在如图 8 所示的仿真场景下，两架飞机飞行方向垂直相遇，飞行速度为0.8 Mach，仿真结果如图 9 所示。

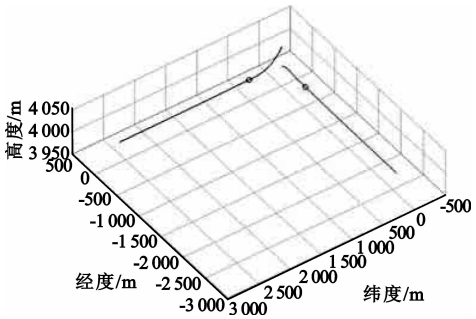

图 8 垂直飞行仿真场景

Fig.8 Aircraft traces during beam scenario

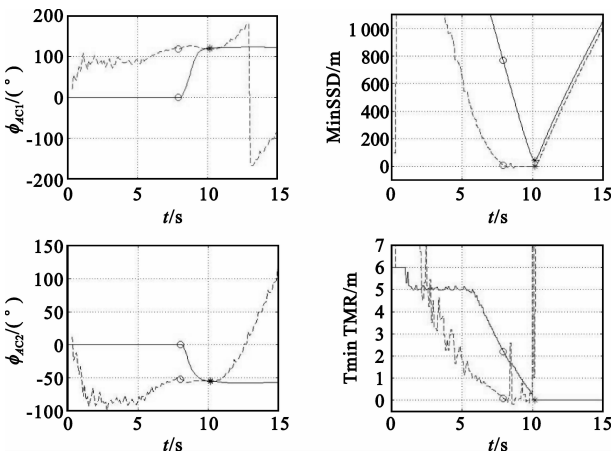

图 9 垂直飞行场景仿真结果

Fig.9 Simulation results under the beam scenario

算法执行结果如下：逃逸操作在两架飞机相距为770 m时执行，持续时间为2.2 s，飞机 1 做滚转 +120°操作，飞机 2 做滚转 −50°操作。

5.3 追逐飞行仿真

在如图 10 所示的仿真场景下，两架飞机迎头以相同方向飞行，飞机 1 飞行速度为0.8 Mach，飞机 2 飞行速度为0.6 Mach，然后转向同一方向飞行，仿真结果如图 11 所示。

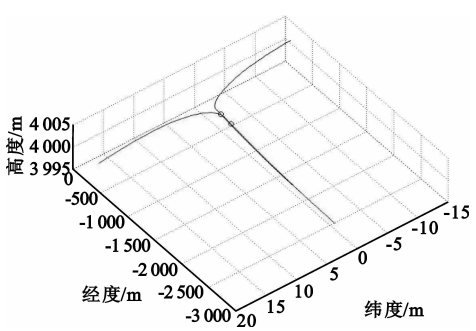

图 10 追逐飞行仿真场景

Fig.10 Aircraft traces during catch-up scenario

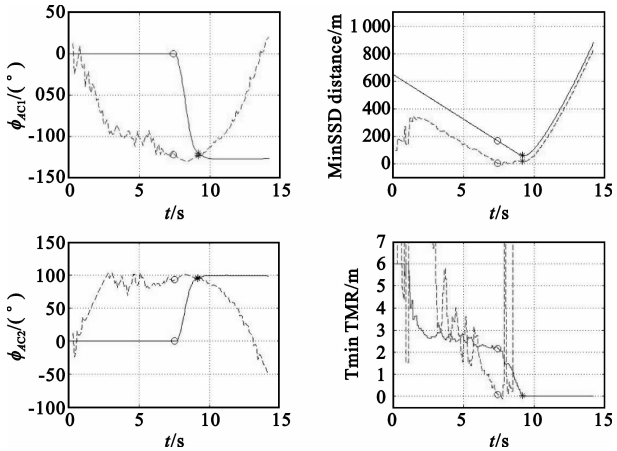

图 11　仿真结果

Fig.11 Simulation results under the catch-up scenario

算法执行结果如下:逃逸操作在两架飞机相距为170 m时执行,持续时间为1.8 s,飞机 1(飞行速度为0.8 Mach)做滚转 -120°操作,飞机 2 做滚转 +95°操作。

6　结束语

本文对基于数据链的空中自动防撞技术进行了分析,仿真结果表明,采用数据链并设计适当的控制算法,实现无人机编队飞行防撞是可行的。该技术要求飞机能够提前预测其飞行轨迹,飞机之间具备通信数据链路。空中自动防撞技术具有一定的通用性,可适应包括战斗机、无人机等多种平台。应用于有人的战斗机时,要求自动防撞系统不能对飞行员的操作形成干扰。该技术对无人机编队执行任务具有重要意义。本文提出了最有逃避动机选择途径,但是对具体条件下的优化控制方法还需要进一步分析。

参考文献:

[1] 周其焕. 交通警戒和避撞系统的技术特点和发展现状[J]. 航空电子技术,1999,95(2):10 - 16.
ZHOU Qi-huan. The Technical Characteristic of the Trafiic Alert and Collision Avoidance System Characteristic[J]. Journal of China Civil Aviation Flying College,1999,95(2):40 - 42.(in Chinese)

[2] Sundqvist B G. Auto-ACAS robust nuisance free collision avoidance[C]//Proceeding of the 44th IEEE Conference on Decision and Control and 2005 European Control Conference. New York, USA:IEEE,2005:3961 - 3963.

[3] Belkin V, Yanovsky F. Aircraft collision avoidance system [C]//Proceeding of the 2007 IEEE Aerospace Conference. Montana, Piscataway,USA:IEEE,2007:1 - 9.

[4] Jameson S, Frank J, Szczerba R,et al. Collaborative autonomy for Manned/Unmanned teams[C]//Proceeding of the American Helicopter Society 61th Annual Forum. Grapevine, TX, USA:IEEE,2005:1 - 10.

[5] Ikeda Y,Nguyen B, Barfield A, et al. Automatic air collision avoidance system[C]//Proceeding of the 41st Society of Instrument and Control Engineers Conference. New York,USA: IEEE,2002:630 - 635.

[6] 彭良福, 林云松. 自动空中防撞系统的技术特点[J]. 中国民航飞行学院学报,2010,21(1):7 - 11.
PENG Liang-fu, LIN Yun-song. The technical characteristic of the Auto-ACAS[J]. Journal of China Civil Aviation Flying College,2010,21(1):7 - 11.(in Chinese)

[7] 彭良福, 林云松. 空中自动防撞系统最优逃避机动的确定[J].控制理论与应用,2010,27(11):1575 - 1579.
PENG Liang-fu, LIN Yun-song. Determination of optimal escape maneuver for automatic air collision avoidance system [J]. Control Theory & Applications,2010, 27(11):1575 - 1579.(in Chinese)

[8] Sundqvist B G, Persson A, Pellebergs J, et al. Automatic Aircraft Collision Avoidance System for Air Combat Maneuvering[C]//Proceedings of 23rd International Congress of Aeronautical Sciences.Toronto,Canada:IEEE,2002:1 - 5.

作者简介:

严　雯(1983—),女,四川高县人,2009 于电子科技大学获硕士学位, 现为工程师,主要研究方向为航空通信系统总体设计;

YAN Wen was born in Gaoxian, Sichuan Province, in 1983. She received the M.S. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2009. She is now an engineer. Her research concerns avionics system and communication system design.

Email:yanwen9@126.com

王洪涛(1979—) ,男,陕西人,2001 年于兰州大学获学士学位,现为工程师,主要研究方向为航空通信系统总体设计;

WANG Hong-tao was born in Shaanxi Province, in 1979. He received the B.S. degree from Lanzhou University in 2001. He is now an engineer. His research concerns avionic communication system design.

Email:camou001@yahoo.com.cn

卿　利(1973—),男,四川内江人, 2007 年于电子科技大学获计算机应用技术专业博士学位,现为高级工程师,主要研究领域为自组织网络、数据链技术等;

QING Li was born in Neijiang, Sichuan Province, in 1973. He received the Ph.D. degree from University of Electronics Science and Technology of China in 2007. He is now a senior engineer. His research concerns Ad hoc networks, data link etc.

梁桃红(1969—),男,江苏人,2007 年于空军工程大学获硕士学位,主要研究领域为指挥自动化。

LIANG Tao-hong was born in Jiangsu Province,in 1969.He received the M.S. degree from Air Force Engineering University in 2007. His research concerns automated command and control.