

引用格式:李波,翟书颖,李茹,等.基于ADS-B的时间轴映射航路冲突检测算法[J].电光与控制,2019,26(3):8-11,29. LI B, ZHAI S Y, LI R, et al. A route conflict detection algorithm based on ADS-B's time-axis mapping[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(3):8-11, 29.

基于 ADS-B 的时间轴映射航路冲突检测算法

李波, 翟书颖, 李茹, 保慧琴, 刘建都
(西北工业大学明德学院, 西安 710124)

摘要: 由于 ADS-B 工作范围广, 将其应用于航空防撞系统时, 在原先的防撞区域外再构建保护区域进行提前防撞, 可进一步提高防撞系统性能, 航路冲突检测是提前防撞的前提, 其算法复杂。提出时间轴映射航路冲突检测算法, 将航路冲突问题转化为分别求解 X, Y, Z 轴冲突区间问题, 再由 X, Y, Z 轴的冲突区间分别映射到时间轴得到冲突时间段, 最后通过求解 3 个冲突时间段的交集来确定航路冲突。仿真实验中, 对 ADS-B 工作范围 100 n mile 内的入侵飞机在 ATC 规定的防撞区域进行航路冲突检测, 结果只有 1% 左右的入侵飞机存在冲突, 这与 ATC 规定的防撞区域和 ADS-B 工作范围 100 n mile 体积之比接近, 证明算法的正确性。

关键词: 航路冲突; 冲突检测; ADS-B; 防撞

中图分类号: V328.5 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.03.002

A Route Conflict Detection Algorithm Based on ADS-B's Time-Axis Mapping

LI Bo, ZHAI Shu-ying, LI Ru, BAO Hui-qin, LIU Jian-du
(Ming De College, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710124, China)

Abstract: ADS-B has a wide working range, and when it is applied to the collision-avoidance system in aviation, it builds a protective zone outside the previous collision-avoidance zone to avoid any collision from happening in advance, which further improves the performance of the collision-avoidance system. The detection of route conflicts is the premise of avoiding collision in advance, and the relevant algorithms are complex. To solve the problem, an algorithm of route conflict detection was proposed based on time-axis mapping. First, this algorithm interpreted route conflict as an issue of calculating the conflict intervals on the X, Y and Z axis respectively. Then, the conflict intervals on the X, Y and Z axis were mapped onto the time axis to get the conflict time periods. Finally, the intersection of the three conflict time periods was calculated to determine the route conflict. In the simulation, a detection test for the route conflicts of the invading aircrafts was conducted in the ATC collision-avoidance area within 100 nautical miles of the ADS-B working range. The results showed that only 1% of the invading aircrafts were in conflict, which was close to the volume ratio between the ATC collision-avoidance area and the 100 nautical miles of the ADS-B working range. Therefore, the correctness of the algorithm is proved.

Key words: route conflict; conflict detection; ADS-B; collision avoidance

0 引言

近些年我国航空运输业发展迅速, 同时, 伴随着低空空域的开放, 通用航空和无人机也都将快速发展^[1-2],

我国空域尤其是中低空空域随之将变得越来越拥挤^[2-3], 而飞行安全问题也将变得越来越突出。进入 21 世纪, 飞机相撞事件屡屡发生, 数据表明, 90% 以上的飞机相撞事故发生在低空, 且大部分为通用航空^[2]。

根据 ATC (Air Traffic Control) 规定, 以飞机为中心, 方圆 5 n mile (9.26 km)、上下 1200 ft (约 366 m) 为防撞区域, 禁止其他航空器闯入, 否则就有碰撞的可能, 需要进行防撞处理^[2]。TCAS (Traffic Alert and Collision Avoidance System) 在此区域进行 TA (Traffic Advi-

收稿日期: 2018-04-08

修回日期: 2018-05-13

基金项目: 陕西省教育厅科研计划项目 (17JK1139); 西北工业大学明德学院科研基金项目 (2016XY02L03)

作者简介: 李波 (1974—), 男, 山东青岛人, 博士, 副教授, 研究方向为防撞系统、无线通信、嵌入式系统。

sory)和RA(Resolution Advisory)两级避撞。

近年来,随着广播式自动相关监视(ADS-B)快速发展,ADS-B可广泛应用于运输航空、通用航空、无人机的监视管理以及防撞系统^[1-9]。ADS-B传输信息丰富,工作范围广,一般认为ADS-B的有效工作范围为100 n mile(约为185 km)^[2-3,7-9],借助ADS-B可以在ATC规定的避撞区域外构建保护区,进行提前避撞^[2-3,7-9],以增强避撞性能。如在文献[10]中的5 min范围内保护区避撞,文献[2-3,11-12]中的40~100 n mile范围内提前避撞,文献[8]中5~40 n mile的保护区避撞等。相比TCAS,ADS-B提供信息(飞机位置、速度等三维信息)更丰富,而TCAS只能提供两飞机间距离测量值和高度信息等,不能提供三维信息^[13]。在保护区内利用ADS-B的丰富信息进行提前避撞,可大大提高避撞系统性能,以适应未来新航行系统对避撞要求的提高,同时也有利于在中低空区域运输航空与通用航空及无人机间的避撞处理。

保护区是一个很大的空间,进入该区域的入侵飞机与本机相撞的可能性较低,不需要对所有入侵飞机都进行避撞处理,那样会增加本机不必要的躲避动作,增加飞行的不舒适性,也会增大处理负担;而一般都是对入侵飞机先进行航路冲突检测,对冲突的入侵飞机进行避撞处理,对无冲突的不需要处理,如文献[2-3,8-9,11-12]。但航路的冲突检测非常复杂,文献[8-9]要对航路点采样进行检测,这样会造成运算量增大;文献[11-12]进行简化,将二维平面划分为8个区域分别进行判断检测;文献[2-3]是将三维空间划分为26个区域再分别进行判断检测。这种分区域检测方法从原理上有一定的不科学性,因为,入侵飞机与本机的相对关系是动态变化的,所处的区域会发生变化。文献[2-3,11-12]的仿真实验中能检测出不冲突的飞机数量少,这与实际情况不相符,也说明这种划分区域进行冲突检测的方法不科学,效率不高,而且算法还很复杂。

本文提出时间轴映射的航路冲突检测算法,在该算法中,先将航路冲突问题转化为求解三维坐标 (X, Y, Z) 的冲突问题,将三维坐标轴的冲突区域统一映射到时间轴上的冲突时间段,再判断3个冲突时间段是否有交集,以此来判断是否存在航路冲突。实验证明,该算法非常有效,原理清晰而且计算量小,易于工程实现。

1 飞机周围空间区域划分

本文主要研究提前避撞区域的航路冲突检测问题,所以飞机空间区域只关注两个区域,即避撞区域(CAZ)和保护区(PAZ),如图1所示。

CAZ采用ATC规定的避撞区域,即以本机为中

心,水平面半径为9.26 km,上下0.366 km的圆柱体区域;PAZ的大小可根据需要由使用者设定,在本文研究中采用半径为185 km(100 n mile)的圆球体,即ADS-B的工作范围。

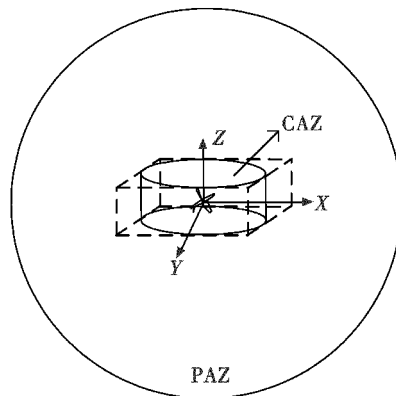


图1 飞机周围空间划分

Fig. 1 Space around the plane

航路冲突判断条件:当入侵飞机进入PAZ区域,即进行其航路与本机的航路冲突检测,如果入侵飞机航路进入本机航路上的CAZ区域,即认为入侵飞机与本机存在航路冲突。

2 时间轴映射的航路冲突检测算法

为方便计算,先对CAZ区域圆柱体的外切长方体进行冲突检测(水平面为正方形),此长方体的水平面正方形4条边分别与X轴和Y轴平行,如图1中虚线部分所示。如果CAZ外切长方体区域存在冲突,再对冲突区域进一步判定是否在圆柱体内。

2.1 航路冲突判断条件量化

由ADS-B信息容易得到飞机的位置和航速,经坐标转换,得到位置 (X, Y, Z) 和航速 (V_x, V_y, V_z) ,其中 (V_x, V_y, V_z) 分别为X, Y和Z轴上的航速。假定本机为A,入侵飞机为B,则A的坐标为 (X_A, Y_A, Z_A) ,航速为 (V_{xA}, V_{yA}, V_{zA}) ;B的坐标为 (X_B, Y_B, Z_B) ,航速为 (V_{xB}, V_{yB}, V_{zB}) 。

A和B发生冲突,要满足以下2个条件。

1) 条件1. 航路上存在一个区域,满足在X, Y, Z轴同时发生冲突,即满足

$$\begin{cases} |X_A - X_B| < 9.26 \text{ km} \\ |Y_A - Y_B| < 9.26 \text{ km} \\ |Z_A - Z_B| < 0.366 \text{ km} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中的X, Y, Z的冲突区域分别对应冲突时间 $[t_{x1}, t_{x2}]$, $[t_{y1}, t_{y2}]$, $[t_{z1}, t_{z2}]$,则式(1)问题就可以转化为求解 $[t_{x1}, t_{x2}]$, $[t_{y1}, t_{y2}]$, $[t_{z1}, t_{z2}]$ 是否有交集的问题:如果有交集,则表明在X, Y, Z轴的冲突发生在同

一个时间段,即同一个区域,则存在冲突;相反,如果没有交集,则表明 X, Y, Z 轴的冲突不是发生在同一个时间段,即不是同一个区域,则不冲突。

2) 条件2。设定冲突位置处理范围,由条件1得到的冲突位置如果位于冲突处理范围内,即认定航路冲突,需进行避撞处理,如果位于冲突处理范围外,则不认定航路冲突,不进行避撞处理。此冲突处理范围值可由工作人员进行设定,此处,以 ADS-B 工作范围 185 km 进行研究。

限定条件2是因为由条件1得到的冲突位置有可能离本机非常远(如大于 185 km),则发生冲突时间(即飞机到达冲突位置的时间)可能非常长。例如本机到达监视区域边界需要的时间约为 12.3 min,在这样长的时间内,飞机可能已改变航向。

2.2 航路冲突检测算法

航路冲突检测首先要分别求解 X, Y, Z 轴方向的冲突时间段。 X, Y, Z 轴方向检测算法类似,下面主要以 X 轴为例进行分析。

飞机 A 和飞机 B 的未来位置与其当前位置和速度有关,此处假定其速度是恒定不变的(大多数时间飞机的速度是恒定不变的),其在 X 轴上坐标分别为 X_A 和 X_B ,速度分别为 V_{XA} 和 V_{XB} ,速度是矢量,方向以 X 轴方向为正方向。

当 $X_A > X_B$ & $V_{XA} > V_{XB}$, X 轴方向距离会增大;当 $X_A < X_B$ & $V_{XA} < V_{XB}$, X 轴方向距离会增大;当 $X_A > X_B$ & $V_{XA} < V_{XB}$, X 轴方向距离会减小;当 $X_A < X_B$ & $V_{XA} > V_{XB}$, X 轴方向距离会减小。

前2种情况可综合表示为: $(X_A - X_B) * (V_{XA} - V_{XB}) > 0$, X 轴方向距离会增大;后2种情况可以综合表示为: $(X_A - X_B) * (V_{XA} - V_{XB}) < 0$, X 轴方向距离会减小;当 $(V_{XA} - V_{XB}) = 0$, X 轴方向距离不变。因此,在 X 轴方向冲突情况分为以下5种情况。

1) 情况1。 $|X_A - X_B| \geq 9.26$ & $(X_A - X_B) * (V_{XA} - V_{XB}) \geq 0$ 。

不冲突,也就无冲突区域以及冲突时间段。

2) 情况2。 $|X_A - X_B| < 9.26$ & $(X_A - X_B) * (V_{XA} - V_{XB}) = 0$ 。

有冲突,冲突时间段为: $[t_{X1}, t_{X2}] = [0, +\infty)$ 。

3) 情况3。 $|X_A - X_B| < 9.26$ & $(X_A - X_B) * (V_{XA} - V_{XB}) > 0$ 。

有冲突,冲突时间段为: $[t_{X1}, t_{X2}] = [0, (9.26 - |X_A - X_B|) / |V_{XA} - V_{XB}|]$ 。

4) 情况4。 $|X_A - X_B| < 9.26$ & $(X_A - X_B) * (V_{XA} - V_{XB}) < 0$ 。

有冲突,冲突时间段为: $[t_{X1}, t_{X2}] = [0, (|X_A - X_B| + 9.26) / |V_{XA} - V_{XB}|]$ 。

5) 情况5。 $|X_A - X_B| \geq 9.26$ & $(X_A - X_B) * (V_{XA} - V_{XB}) < 0$ 。

有冲突,冲突时间段为: $[t_{X1}, t_{X2}] = [(|X_A - X_B| - 9.26) / |V_{XA} - V_{XB}|, (|X_A - X_B| + 9.26) / |V_{XA} - V_{XB}|]$ 。

5种情况只有情况1无冲突,也就无冲突时间,情况2~5均为有冲突,可求出相对应的冲突时间。先计算情况1,如果成立,则无冲突时间,则肯定 X, Y, Z 轴无冲突时间交集,即飞机 A 和飞机 B 不会发生冲突,后续计算都可取消;相反,如果情况1不成立,则表明 X 轴有冲突,通过情况2~5求出冲突时间。

以同样方法求解 Y 轴和 Z 轴情况,只是在计算 Z 轴时,参数由 9.26 变为 0.366。

求解入侵飞机与本机 CAZ 区域外切长方体冲突情况的算法流程如图2所示,其中, V_A 是本机的真实速度, $V_A^2 = V_{XA}^2 + V_{YA}^2 + V_{ZA}^2$ 。

图2中, X, Y, Z 轴情况1的计算判断顺序不是固定的,图中给出的是 X 轴在前,也可以 Y 轴或 Z 轴在前。

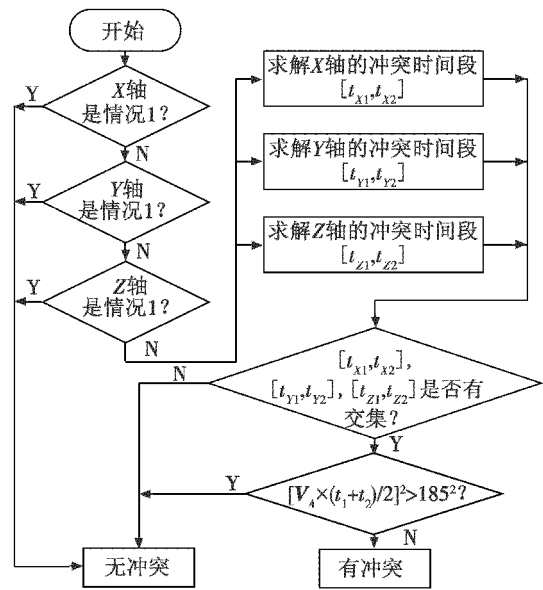


图2 冲突检测流程图

Fig.2 Flow chart of conflict detection

图2所示计算流程是判断入侵飞机与本机的 CAZ 区域外切长方体区域是否冲突,如果存在冲突,则需要再精确判断一下冲突区域是否在圆柱体内,即

$$[(V_{XA} - V_{XB}) * (t_1 + t_2) / 2 + X_A - X_B]^2 + [(V_{YA} - V_{YB}) * (t_1 + t_2) / 2 + Y_A - Y_B]^2 > 9.26^2 \quad (2)$$

若式(2)成立,则不冲突,否则就是入侵飞机与本机存在航路冲突。至此,全部航路冲突检测完毕。

3 仿真实验

航空运输巡航速度一般大约为 700 ~ 1000 km/h。为计算方便,设定本机位置为(0,0,0),单位 km,速度为

(900,0,0),单位 km/h。进行 100 次实验,每次实验设定进入 PAZ 区域入侵飞机数量为 1000 架,设定 PAZ 区域范围值为 185 km,航路冲突处理范围为 185 km。

1000 架进入 PAZ 区域的入侵飞机的位置为 (X, Y, Z) , X, Y, Z 值随机,但要满足 $9.26^2 < (X^2 + Y^2 + Z^2) < 185^2$;其飞行方向随机,表现在速度上 V_x, V_y, V_z 值是随机的,但应满足 $700^2 \leq (V_x^2 + V_y^2 + V_z^2) \leq 1000^2$ 。

图 3 是 100 次实验中一次的 1000 架入侵飞机的基本情况图。

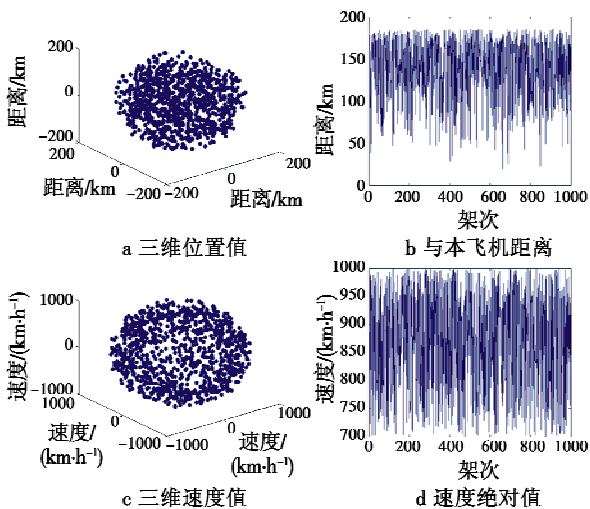


图 3 1000 架入侵飞机的位置与速度

Fig. 3 The position and speed of 1000 intruders

图 4 为 100 次实验结果图,横坐标为 100 次实验,纵坐标为检测得到的每次 1000 架入侵飞机与本机航路冲突架次。

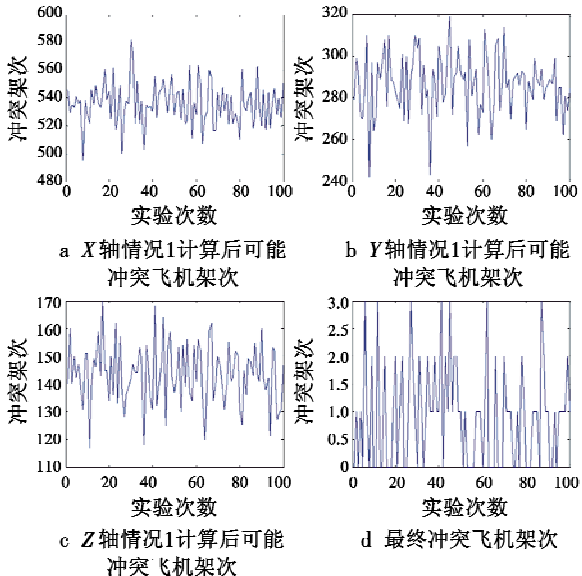


图 4 100 次实验,每次对 1000 架入侵飞机航路冲突检测实验结果

Fig. 4 Route conflict detection results of 1000 invading aircrafts (test for 100 times)

对照图 2,图 4a 为计算完 X 轴情况 1 后可能的冲突飞机架次,平均约为 530,即只有约 53% 进入后续计算;图 4b 为计算完 Y 轴情况 1 后可能的冲突飞机架次,平均约为 290,即只有约 29% 进入后续计算;图 4c 为计算完 Z 轴情况 1 后可能的冲突飞机架次,平均约为 145,即只有约 14.5% 在 X, Y, Z 轴同时存在冲突,此时需要计算在 X, Y, Z 轴冲突时对应的冲突时间段,并通过计算冲突的时间段的交集进一步判断冲突情况,最终结果如图 4d 所示。只有平均约 1% 与本机存在冲突,此数值与 ATC 避撞区域及 ADS-B 工作范围的体积比接近,证明了算法的准确性。

从图 2 计算流程和图 4 结果可以看出,大部分不冲突入侵飞机只需要经过很少的计算就可以确定并排除,所以,总体上本文冲突检测算法计算量非常小,也利于工程实现。

4 结语

本文将三维空间内航路冲突检测难题通过映射到时间轴来实现,简化了检测过程,算法原理清晰、实现简单、计算量小、冲突检测准确。

本文介绍计算方法时的检测范围取值为 ADS-B 工作范围 185 km(100 n mile),航路冲突处理范围也取值为 185 km,此两值取值范围较大,在工程实现时可根据需要适当进行调整,当检测范围缩小、航路冲突处理范围扩大,检测得到的冲突比例会增大。

参考文献

- [1] 中国民用航空局. 中国民用航空 ADS-B 实施规划[EB/OL]. [2018-05-13]. <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/ZFGW/201601/P020160122452771994581.pdf>.
- [2] 周波. 基于 ADS-B 的低空飞行冲突检测与解脱算法研究[D]. 天津:中国民航大学,2014.
- [3] 周波,王海军,阮文龙,等. 基于 ADS-BIN 的冲突检测预处理方法[J]. 电光与控制,2017,24(10):64-68,74.
- [4] DANIEL B S, LUCIO F V, ANTONIO V S N. An approach to assess the safety of ADS-B based unmanned aerial systems; data integrity as a safety issue[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2016(84):621-638.
- [5] 王雪峰,胡潇,杨明,等. 无人机空管领域现状分析与空管系统设计[J]. 现代导航,2016,7(5):330-334.
- [6] 刘慧颖,白存儒,杨广琳. 无人机自主防撞关键技术与应用分析[J]. 航空工程进展,2014,5(2):141-147.
- [7] KUNZI F, HANSMAN R J. Development of a high precision ADS-B based conflict alerting system for operations in the airport environment[D]. Cambridge; Massachusetts

- [2] XIANG C, FENG D Z, LV H, et al. Robust adaptive beamforming for MIMO radar[J]. *Signal Processing*, 2010, 90(12):3185-3196.
- [3] 王勇. MIMO 雷达稳健的自适应波束形成方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2012.
- [4] 谭志浩,金伟,贾维敏. MIMO 雷达迭代最差性能最优鲁棒波束形成算法[J]. *信号处理*,2018,34(2):192-200.
- [5] 熊孝华,杨安会. 现代雷达信号处理及发展趋势研究[J]. *中国高新技术企业*,2011(13):23-24.
- [6] 李茂仙,董天临,黄高明. 一种针对分布 MIMO 雷达的高效干扰功率分配方法[J]. *火力与指挥控制*,2017,42(4):26-31.
- [7] HUANG L, ZHANG J, XU Z, et al. Robust adaptive beamforming with a novel interference-plus-noise covariance matrix reconstruction method[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2015, 63(7):1643-1650.
- [8] DU L, LI J, STOICA P. Fully automatic computation of diagonal loading levels for robust adaptive beamforming[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(1):449-458.
- [9] VOROBYOV S A, GERSHMAN A B, LUO Z Q. Robust adaptive beamforming using worst-case performance optimization; a solution to the signal mismatch problem[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, 51(2):313-324.
- [10] LI J, STOICA P, WANG Z S. On robust Capon beamforming and diagonal loading[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, 51(7):1702-1715.
- [11] VOROBYOV S A, CHEN H, GERSHMAN B. On the relationship between robust minimum variance beamformers with probabilistic and worst case distortionless response of constraints[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(11):5719-5724.
- [12] JIN W, JIA W M, YAO M L, et al. Robust adaptive beamforming based on iterative implementation of worst-case performance optimization[J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(22):1389-1391.
- [13] NAI S E, SER W, YU Z L, et al. Iterative robust minimum variance beamforming[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(4):1601-1611.
- [14] 虞泓波,冯大政,解虎. MIMO 雷达迭代降维稳健波束形成方法[J]. *西安电子科技大学学报*,2016,43(1):30-35.

(上接第 11 页)

Institute of Technology, 2013.

- [8] 马宇申. 基于 ADS-B 的空中交通预警防撞技术研究[D]. 天津:中国民航大学,2014.
- [9] 李仙颖. 基于 ADS-BIN 的终端区避撞仿真平台设计与实现[D]. 天津:中国民航大学,2016.
- [10] 罗文田,赵泽荣,张德银. 基于 ADS-B 的飞机预警避撞算法研究[J]. *控制工程*,2011,18(4):559-563.
- [11] 戴超成,肖刚,敬忠良. 采用 ADS-B 的冲突飞机选择算法[J]. *电光与控制*,2011,18(10):11-14,19.
- [12] XIAO G, XU Y, DAI C, et al. A selection algorithm for conflict aircrafts and performance analysis based on ADS-B [C]//*Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, IEEE, 2011:1D3-1-1D3-6.
- [13] HWANG S S, SPEYER J L. Collision detection system based on differential carrier-phase global positioning system broadcasts[J]. *Journal of Aircraft*, 2009, 46(6):2077-2089.

(上接第 15 页)

测[J]. *光学精密工程*,2017,25(7):1954-1960.

- [3] 王敏,赵金宇,陈涛,等. 基于时空域的暗弱空间运动点目标检测算法[J]. *电子与信息学报*,2017,39(7):1578-1584.
- [4] 张健,娄树理,任建存. 基于时序多帧投影的空间目标检测算法[J]. *激光与红外*,2015,45(1):88-93.
- [5] 张健,奚晓梁,周晓东. 基于运动信息的星图中空间目标检测算法[J]. *系统工程与电子技术*,2014,36(5):838-845.
- [6] 周苑,张健民,林晓. 基于加权 LoG 算子的红外弱小目标检测方法研究[J]. *应用光学*,2017,38(1):114-119.
- [7] 刘帅,王铎,孙腾飞. 基于 SUSAN 算子的白天红外星目标检测[J]. *红外技术*,2013,23(9):571-574,586.
- [8] 王鲲鹏,马超伟,侯旺,等. 凝视观测图像空间弱小目标检测方法[J]. *应用光学*,2014,35(4):614-618.
- [9] 蒲静松,许东,刘乙君,等. 星空背景下红外弱小目标的快速检测[J]. *激光与红外*,2017,47(4):513-518.
- [10] 乔立永,徐立新,高敏. 红外目标识别图像复杂度度量方法综述[J]. *红外技术*,2013,35(2):88-96.
- [11] 周冰,王永仲,应家驹. 弱小目标检测技术浅析[J]. *红外技术*,2007,29(1):30-33.
- [12] 张惠娟,梁彦,程咏梅,等. 运动弱小目标先跟踪后检测技术的研究进展[J]. *红外技术*,2006,28(7):423-430.
- [13] CHU P L. *Efficient detection of small moving objects*[D]. Lexington:Massachusetts Institute of Technology, 1989.