

引用格式:周波,王海军,阮文龙,等.基于 ADS-B IN 的冲突检测预处理方法[J].电光与控制,2017,24(10):64-68,74. ZHOU B, WANG H J, RUAN W L, et al. An ADS-B IN based preprocessing algorithm before conflict detection[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(10):64-68, 74.

基于 ADS-B IN 的冲突检测预处理方法

周 波¹, 王海军¹, 阮文龙¹, 唐志虎¹, 沈笑云²

(1. 中国民用航空中南地区空中交通管理局湖北分局, 武汉 430302;

2. 中国民航大学智能信号与图像处理天津市重点实验室, 天津 300300)

摘要: 飞行流量增加及航迹的不确定性加大了目标间冲突的可能性, 针对目标间冲突检测与解脱时大量无关联监视目标造成冗余运算问题, 提出一种冲突检测预处理方法。将 ADS-B IN 监视范围内的目标规划到 26 个区域, 每一个区域中依据设定的专门规则判别目标与本机的相关性, 关联目标将参与冲突检测等后续运算, 无关联目标的后续处理则被阻塞。算法能有效减少本机周围交通态势安全评估时的运算量, 坚持宁虚警、不漏警原则, 从而确保安全为首要目标。最后通过蒙特卡罗实验检验了算法各项性能。实验表明, 随机产生的 30 个目标中, 不少于 30% 的目标被判定为无冲突关联而被阻塞, 算法能有效检测目标间的相关性。

关键词: 广播自动相关监视; 交通态势监视; 多目标; 相关性; 冲突检测

中图分类号: V328.5 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2017.10.013

An ADS-B IN Based Preprocessing Algorithm Before Conflict Detection

ZHOU Bo¹, WANG Hai-jun¹, RUAN Wen-long¹, TANG Zhi-hu¹, SHEN Xiao-yun²

(1. Hubei Branch, Air Traffic Management Bureau of Middle & Southern Region, CAAC, Wuhan 430302, China;

2. Tianjin Key Lab for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The probability of flight conflict is increased because of the increasing of flight flow and uncertainty of flight route. Considering the problem of redundant operation caused by a large number of non-related objects, a preprocessing algorithm for use before conflict detection was proposed. The objects within the surveillance scope of ADS-B IN were divided into 26 different regions, and the correlation of the objects with the own aircraft was distinguished by the specialized rule of each region. Then the correlated objects were further processed, while the uncorrelated ones were blocked. Therefore, the calculation burden for estimation of surrounding traffic situation safety was decreased. The processing principle was “safety the first,” and “better false alarm, never missed alarm”. Finally, the necessity and validity of the proposed algorithm were examined by using Monte Carlo experiment. The simulation results showed that not less than 30% of 30 random objects were blocked. The proposed algorithm is effective and accurate for detecting the correlation between targets.

Key words: ADS-B; traffic situation monitoring; multi-target; correlation; conflict detection

0 引言

未来中低空航空器灵活多样的任务及相对自主的飞行方式, 导致地面对其监视引导变得相对困难, 同时受中低空复杂空情及环境要素等约束, 飞行航迹不确

定性增加, 由此引发的目标间冲突风险将增大, 航空器需具备有效的冲突检测与解脱能力。机载交通警戒与防撞系统(Traffic Alert and Collision Avoidance System, TCAS)和广播式自动相关监视 IN 功能(ADS-B IN)相结合共同承担航空器周围交通态势监视警戒任务有利于提高飞行主体自主决策能力, 飞行主体依据可选择的咨询报告实施冲突规避, 降低航空器对地面监视及管制体系的依赖, 减轻空中交通管理压力^[1-3]。

当前 TCAS II 最新版本仍基于第三代监视技术开

收稿日期: 2016-01-27

修回日期: 2017-09-01

基金项目: 天津市应用基础与前沿技术研究计划(14JCYBJC16000)

作者简介: 周 波(1985—), 男, 湖北黄冈人, 硕士, 研究方向为空中交通管理、导航监视。

发,其性能受限于系统误差、更新率及探测范围等,无法提供水平解脱方案,ADS-B IN 技术的融入有望解决该缺陷。依靠 ADS-B IN 系统提供高精度、高更新率的信息,飞行驾驶员能及时掌握本机周围大范围多目标的交通态势,通过安全验证后的数据可应用于 TCAS 系统进行各种场景下飞行冲突的精确计算,最终实时提供安全可靠的交通警戒报告、冲突解脱咨询报告等^[4]。但是,大量无关联监视目标参与目标间冲突检测与解脱算法运算会带来不必要的冗余计算,极大地浪费了机载计算机资源^[5-7],本文提出一种冲突检测前预处理方法,通过实时判断本机与周围监视目标的相关性,阻塞大量无关联目标的后续处理。

ADS-B 数据与 CDTI 相结合具有增强情景意识等功能^[8-9],ADS-B/CDTI 与 TCAS 系统的综合集成极具应用价值。TCAS IV 系统作为下一代防撞撞机载设备,将有效缩小飞行间隔,提升空中交通流量。飞行员通过 CDTI 可直接了解空中交通情况,并按照指示处理突发情况。针对 CDTI 显示目标多及基于冲突目标特征要素,开发过滤算法是必要的^[10-12]。在统一坐标系中,保留可能与本机冲突的目标,与本机无冲突目标应被屏蔽或隐藏处理,被冲突检测的目标越少越好,可降低机载设备处理器的运算量。但文献^[10-12]中方法仅从平面二维角度考虑,且考虑的是商用航空理想情况,过滤规则设置过于简化,尤其是临界区域划分过于“生硬”,导致产生难以准确有效判断的盲区,在盲区内,状态判别变量与目标相关性间的逻辑关系出现“钝化”现象,甚至发生误判,一旦相关目标被判别为无关目标,极可能导致漏报警而危及安全,这与航空领域强调“安全第一”的理念相违背。

本文算法充分考虑以上缺陷,以本机为中心,将 ADS-B 立体监视范围划分为 26 个区间,计算目标相对于本机的位置及运动状态,量化诱发冲突的变量,持续依据各对应区间规则判别目标间的相关性。将临界区域单独考虑,制定更加详细的过滤条件,有利于对临界边缘处目标的准确判断。同时,坚持“宁可虚警,不可漏警”原则,极力减少算法误判引起的安全风险。

1 相关性判别算法

本文算法基于机心地平直笛卡尔坐标系,即以本机为中心,其投影到地球表面点所在切面为 xoy ,垂直于切面为 z 方向,经地理坐标转换为机心地平直坐标,本机的状态可以表示为: $S_a = [x_1, y_1, z_1, \theta_1, \beta_1, \gamma_1, v_{x1}, v_{y1}, v_{z1}]^T$,其中,前 3 项为位置分量, θ_1, β_1 和 γ_1 分别表示航向角、俯仰角和滚转角, v_{x1}, v_{y1} 和 v_{z1} 表示速度分量。可通过 ADS-B 数据链通信得到目标飞机的状态

信息,目标 $i(i > 1)$ 表示为 $S_b = [x_i, y_i, z_i, \theta_i, \beta_i, \gamma_i, v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}]^T$,则本机和目标机的位置、方向和速度相对量可以表示为 $\Delta S_i = [\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i, \Delta \theta_i, \Delta \beta_i, \Delta \gamma_i, \Delta v_{xi}, \Delta v_{yi}, \Delta v_{zi}]^T$ 。其中: $\Delta x_i = x_i - x_1; \Delta y_i = y_i - y_1; \Delta z_i = z_i - z_1; \Delta v_{xi} = v_{xi} - v_{x1}; \Delta v_{yi} = v_{yi} - v_{y1}; \Delta v_{zi} = v_{zi} - v_{z1}; \Delta \theta_i = \theta_i - \theta_1; \Delta \beta_i = \beta_i - \beta_1; \Delta \gamma_i = \gamma_i - \gamma_1$ 。

在相对运动坐标系中,将本机周围 ADS-B 与 TCAS 有效监视的范围划分为多个区域,然后依据 ΔS_i 实行不同区域不同规则判别。

1.1 区域划分

与 ADS-B 混合监视, TCAS 的有效作用范围有所扩展,本文定义为 r n mile (1 n mile = 1852 m)。在 TCAS 和 ADS-B 混合监视范围内,会对目标采取更加精确跟踪、预测、防冲突措施,所以本文过滤算法将该区域内的目标均视为相关目标,保持密切监视。假设机载 ADS-B 设备监视范围为 R n mile,则目标与本机距离在区域 $[r, R]$ 内即为算法作用范围。图 1 为作用区间,半径为 R 部分圆范围和半径为 r 部分圆范围之间的区域为需要过滤的区域,内侧半径为 r 的部分圆区域为 TCAS 作用范围。在竖直剖面,为减少不必要的检测,可通过给定参数对一定高度层以上的目标实行屏蔽,这在流量大、目标多的繁忙空域显得极为必要,当然也可以不设置参数。

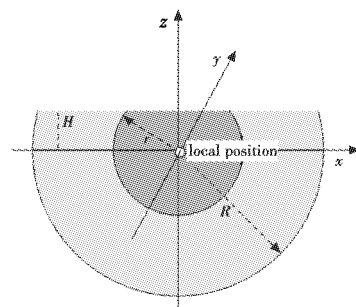


图 1 作用区间示意图

Fig. 1 Schematic diagram of action region

本文根据目标飞机远离当前飞机的特性(参考 1.2 节),可将以本机为中心的区域划分为 26 个区域,其中包含 8 个卦限区域、6 个轴向区域(x, y, z 的正、负方向)和 12 个象限区域。12 个象限区域为: $+x_0 + y$ 象限、 $+x_0 - y$ 象限、 $-x_0 + y$ 象限、 $-x_0 - y$ 象限、 $+x_0 + z$ 象限、 $+x_0 - z$ 象限、 $-x_0 + z$ 象限、 $-x_0 - z$ 象限、 $+y_0 + z$ 象限、 $+y_0 - z$ 象限、 $-y_0 + z$ 象限和 $-y_0 - z$ 象限,其中,“ o ”表示坐标轴的原点。

需要注意的是,卦限区域不包含距各坐标轴和坐标面距离小于 r 的区域,而轴向区域是围绕该轴以 r 为半径的圆柱体区域,象限区域是以 $\pm r$ 为延伸的方体区域,如图 2 中沿 z 轴正方向的扩展区域及 $+x_0 + z$ 象限

的扩展区域所示。

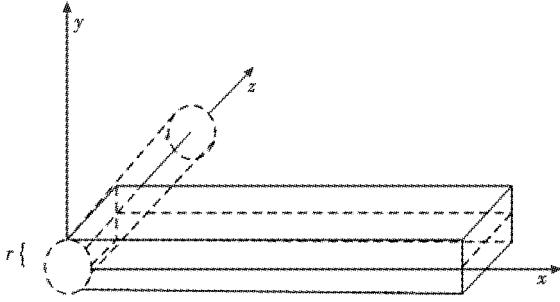


图 2 临界轴面的扩展区域

Fig. 2 Extended region of critical axis and surface

1.2 过滤规则

对于卦限区域,如果目标机相对于本机是远离运动则被过滤。这种远离分为 4 种情况:

- 1) 在 x, y 和 z 3 个方向上均远离;
- 2) 在 x 和 y 上远离, z 方向上接近,但在 x 或 y 方向上远离值在数值上大于 z 方向上接近值;
- 3) 在 y 和 z 上远离, x 方向上接近,但在 y 或 z 方向上远离值在数值上大于 x 方向上接近值;
- 4) 在 x 和 z 上远离, y 方向上接近,但在 x 或 z 方向上远离值在数值上大于 y 方向上接近值。

根据此规律,第一卦限($\Delta x > r, \Delta y > r, \Delta z > r$)的过滤规则为: $(\Delta v_x \geq 0 \cap \Delta v_y \geq 0 \cap \Delta v_z \geq 0) \cup \{\Delta v_x < 0 \cap [(\Delta v_y > 0 \cap \Delta v_z + \Delta v_x > 0) \cup (\Delta v_z > 0 \cap \Delta v_y + \Delta v_x > 0)]\} \cup \{\Delta v_y > 0 \cap [(\Delta v_x > 0 \cap \Delta v_z + \Delta v_y > 0) \cup (\Delta v_z > 0 \cap \Delta v_x + \Delta v_y > 0)]\} \cup \{\Delta v_z < 0 \cap [(\Delta v_x > 0 \cap \Delta v_y + \Delta v_z > 0) \cup (\Delta v_y > 0 \cap \Delta v_x + \Delta v_z > 0)]\}$;而第二卦限($\Delta x < -r, \Delta y > r, \Delta z > r$)的过滤规则为: $(\Delta v_x \leq 0 \cap \Delta v_y \geq 0 \cap \Delta v_z \geq 0) \cup \{\Delta v_x > 0 \cap [(\Delta v_y > 0 \cap \Delta v_z - \Delta v_x > 0) \cup (\Delta v_z > 0 \cap \Delta v_y - \Delta v_x > 0)]\} \cup \{\Delta v_y < 0 \cap [(\Delta v_x > 0 \cap \Delta v_z - \Delta v_y > 0) \cup (\Delta v_z > 0 \cap \Delta v_x - \Delta v_y > 0)]\} \cup \{\Delta v_z < 0 \cap [(\Delta v_x > 0 \cap \Delta v_y - \Delta v_z > 0) \cup (\Delta v_y > 0 \cap \Delta v_x - \Delta v_z > 0)]\}$ 。

可依此类推其他几个卦限规则。

轴向区间中仅需关注的是:不论在哪条轴的哪个方向均遵循目标机相对于本机距离是否发生背离运动。例如,轴向区域 x 轴正方向($\Delta x > r, |\Delta y| < r, |\Delta z| < r$)的过滤规则为 $\Delta v_x > 0$;而 y 轴正方向($|\Delta x| < r, \Delta y > r, |\Delta z| < r$)的过滤规则为 $\Delta v_y > 0$ 。依此规律可以确定其他轴方向的过滤规则。

而对于所有的象限区域,过滤的规则遵循以下两条规律中的一条:1) 目标在两方向之一是接近,但在另一方向的背离距离大于该接近距离;2) 目标在该区域的两个方向上均背离本机。

例如, $+x$ 象限($\Delta x > r, \Delta y > r, |\Delta z| < r$)的过滤规则为: $(\Delta v_x \geq 0 \cup \Delta v_y \geq 0) \cup \{\Delta v_x < 0 \cap [(\Delta v_y > 0 \cap$

$\Delta v_y + \Delta v_z > 0) \cup (|\Delta v_z| + \Delta v_x > 0)]\} \cup \{\Delta v_y < 0 \cap [(\Delta v_x > 0 \cap \Delta v_z + \Delta v_y > 0) \cup (|\Delta v_z| + \Delta v_x > 0)]\}$;而 $+x$ 象限($\Delta x > r, \Delta y < r, |\Delta z| < r$)的过滤规则为: $(\Delta v_x \geq 0 \cup \Delta v_y \leq 0) \cup \{\Delta v_x < 0 \cap [(\Delta v_y < 0 \cap \Delta v_x - \Delta v_y > 0) \cup (|\Delta v_z| + \Delta v_x > 0)]\} \cup \{\Delta v_y > 0 \cap [(\Delta v_x > 0 \cap \Delta v_x - \Delta v_y > 0) \cup (|\Delta v_z| - \Delta v_y > 0)]\}$ 。依此规律同样可以确定其他几个象限区域的过滤规则。

1.3 判别过程

本文过滤算法在综合区域划分及冲突判别过滤规则后具体步骤如下:

- 1) 提取目标机状态量,通过与目标机数据链通信接收报文获取;
- 2) 计算目标机与本机的各参数相对量,如相对位置、方向、相对速度等;
- 3) 判别目标机已进入 TCAS 作用范围 r 内,则调用 TCAS 监视程序与 ADS-B 系统混合监视,未进入则执行步骤 4);
- 4) 确定目标过滤判别区间属于 26 个区间中哪一个;
- 5) 判断该目标与本机相关性;
- 6) 无关目标和相关目标区分显示,仅对相关目标进行后续航迹预测、冲突检测等处理。

2 仿真结果及分析

算法的必要性和有效性是实验关注的核心。具体思路是:首先,在本机 TCAS 作用范围外、ADS-B IN 作用范围内(过滤规则作用区域)随机产生 30 个目标,同时用过滤算法检测,检验算法的必要性;其次,通过对人为设定状态的 30 个目标进行理论分析及算法检测,看二者是否吻合,从而检验算法的准确性。

实验过程中,取 TCAS 与 ADS-B 混合监视范围 $r = 40$ n mile, ADS-B 有效作用距离为 $R = 100$ n mile,取 $H = 3000$ m。

2.1 算法必要性和有效性分析

图 3 是随机产生的 30 个目标时长 500 s 的飞行轨迹,其中各目标的起始跟踪点为图中对应文字标注的位置。图 4 是相关判别算法 500 s 时间段内跟踪过滤的效果。这些过滤后保留的目标包括 40 ~ 100 n mile 范围内过滤无关目标后剩余的目标及 40 n mile 以内的所有目标。由图 4 可以看出,0 ~ 500 s 内持续跟踪最后进入 40 n mile 内不被过滤的飞机只有 14 架,被过滤的飞机数目超过半数,说明过滤算法在冲突预处理过程中是必要的。

为进一步验证,本文利用蒙特卡罗实验模拟交通态势进行统计分析。给定本机的各状态参数,随机产

生周围目标,进行 1 万次模拟实验,每次均随机产生 30 个周围目标,图 5、图 6 是统计结果。

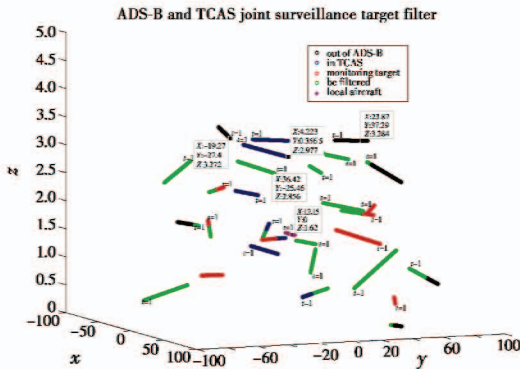


图 3 30 个目标的交通态势图

Fig.3 The traffic situation map of 30 objects

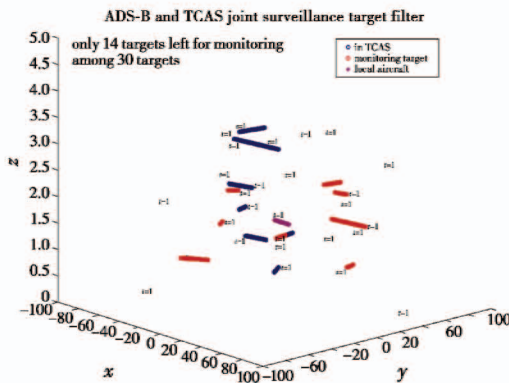


图 4 相关目标显示

Fig.4 Correlated targets

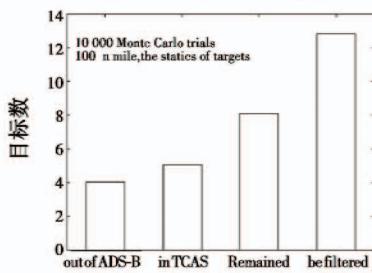


图 5 30 个随机目标 1 万次蒙特卡罗实验结果统计

Fig.5 The statistics of ten thousands times of tests to

30 random targets

图 5 中每次随机产生的 30 架飞机的 1 万次重复实验结果显示,占总数 45% 以上的飞机被过滤,平均达 13 架。从图 6 中可以看出过滤率超过 33%, 平均被过

滤的飞机数不低于 10 架。再次验证了过滤算法的必要性和有效性。

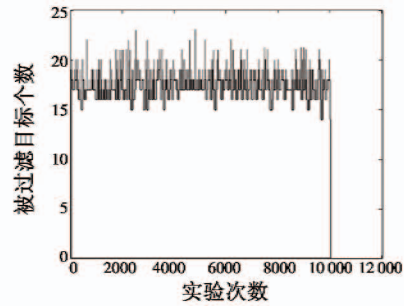


图 6 30 个随机目标 1 万次蒙特卡罗实验被过滤目标数统计

Fig.6 The number of filtered targets by ten thousands

times of tests to 30 random targets

2.2 算法可靠性验证

表 1 中数据是本文设定 30 个目标的位置、速度、姿态和航向等信息,编号为 1 ~ 30,0 表示本机。状态信息包括位置信息、速度信息、姿态、航向和滚转角。位置和速度分别用 x, y, z 3 个方向上的分量来表示。

理论分析结果显示,可能会与本机发生冲突或者进入 TCAS 监视范围(40 ~ 100 n mile)的目标编号为 04,07,14 和 30,需要保留跟踪监视;TCAS 和 ADS-B 混合监视的目标(40 n mile 内)编号为 01,03,17,19 和 28;其他编号的飞机(40 ~ 100 n mile)被判定为不会发生冲突,可以过滤掉。

通过本文的算法过滤,依据表 1 设定的数据,最后一列算法分析结果与倒数第二列理论分析结果是完全相同的,说明本文算法是可靠和准确的。

为了进一步验证算法的可靠性,需要分别对 26 个区间规则验证可靠性。采取的方法是:针对每一个区间,分别单独随机产生 30 个目标(确定位置),同时随机产生目标的相关状态参数(确定航向、速度和姿态等),然后通过本文相关判别算法判断产生的每个目标与本机的相关性,视为实验判别结果。同时,计算后续 T (取 $T=3$ s)内目标与本机的距离变化,若距离减小,说明目标为本机的相关目标,否则为无关目标,视为理论真实结果。每一个区间的验证实验都按照上述过程执行 2 万次,统计结果表明,各区间判别准确率均为 100%,即实验判别结果与理论真实值一致。

表 1 被人工设置状态的 30 个检测目标实验清单

Table 1 The experiment list of 30 targets and status information by manual setting

Serial number	position/n mile			velocity/(n mile · h ⁻¹)			θ /(°) (heading angle)	φ /(°) (pitch angle)	γ /(°) (bank angle)	Conflict	Simulation results
	x	y	z	v_x	v_y	v_z					
01	20.0	0	1.673 9	160	0	0	$-\pi/2$	0	0	A-T	A-T
02	40.0	40.0	1.609 1	100	20	0	-1.373 4	0	0	F	F
03	0	30.0	1.619 9	0	150	0	0	0	0	A-T	A-T
04	0	45.0	1.071 0	0	-100	5	$-\pi$	0.05	0	R	R

续表

Serial number	position/n mile			velocity/(n mile · h ⁻¹)			$\theta/(\circ)$	$\varphi/(\circ)$	$\gamma/(\circ)$	Conflict	Simulation results
	x	y	z	v_x	v_y	v_z	(heading angle)	(pitch angle)	(bank angle)		
05	-50.0	0	1.619 9	120	0	0	$-\pi/2$	0	0	F	F
06	-40.0	-50.0	1.619 9	-10	-100	0	3.041 9	0	0	F	F
07	0	50.0	1.565 9	140	20	0	-1.428 9	0	0	R	R
08	45.0	60.0	1.565 3	-20	-100	0	-3.339 0	0	0	F	F
09	60.0	60.0	1.619 9	-30	100	0	0.291 5	0	0	F	F
10	65.0	30.0	1.071 0	160	10	5	-1.508 4	0.031 2	0	F	F
11	50.0	10.0	2.159 8	150	10	-2	-1.504 2	-0.013 3	0	F	F
12	-50.0	20.0	1.619 9	100	20	0	-1.373 4	0	0	F	F
13	-40.0	42.0	1.835 9	90	30	0	-1.249 0	0	0	F	F
14	-50.0	20.0	1.619 9	170	3	0	-1.553 2	0	0	R	R
15	-10.0	-50.0	1.889 8	-20	-100	0	2.944 2	0	0	F	F
16	-20.0	-35.0	2.159 8	-10	60	2	0.165 1	0.032 9	0	F	F
17	-10.0	-5.0	1.619 9	10	80	0	-0.124 4	0	0	A-T	A-T
18	-48.0	-25.0	2.699 8	-12	98	0	0.121 8	0	0	F	F
19	0	30.0	1.071 0	10	100	1	-0.099 7	0.010 0	0	A-T	A-T
20	0	-55.0	2.159 8	-20	80	0	0.245 0	0	0	F	F
21	20.0	-50.0	1.949 2	-10	-100	0	3.041 9	0	0	F	F
22	30.0	-35.0	1.619 9	10	-98	0	-3.039 9	0	0	F	F
23	10.0	-60.0	1.071 0	-5	-120	0	3.100	0	0	F	F
24	58.0	2.0	1.619 9	160	10	0	-1.508 4	0	0	F	F
25	50.0	30.0	2.429 8	100	60	0	-1.030 4	0	0	F	F
26	-80.0	5.0	1.123 1	120	40	0	-1.249 0	0	0	F	F
27	-20.0	-55.0	1.673 9	100	-70	0	-2.530 9	0	0	F	F
28	-10.0	9.0	1.889 8	50	90	0	-0.507 1	0	0	A-T	A-T
29	50.0	-10.0	2.051 8	120	-60	0	-2.034 4	0	0	F	F
30	60.0	-5.0	1.511 9	-10	80	0	0.124 4	0	0	R	R
0	0	0	1.619 9	150	0	0	$-\pi/2$	0	0		

表中：“R”代表目标为相关目标；“F”代表目标为非相关目标；“A-T”代表目标被 ADS-B 与 TCAS 混合监视。

2.3 算法耗时分析

在一台 4 核酷睿 i3-2100 CPU 主频 3.30 GHz 内存 3 GB 的计算机上验证：在本机周围算法作用区域随机产生 30 个目标，执行本文判别算法。此过程进行 100 万次蒙特卡罗仿真，耗时 11 s，平均一次时间仅约 0.011 ms。

本文算法涉及的过滤规则核心是逻辑判断，利于数字电路快速简单实现，且具有运算量小、耗时短的特点。

3 总结

本文给出一种低空多目标冲突检测前过滤算法，旨在降低无关目标参与冲突检测与解脱时造成的本机冗余运算问题。算法将 ADS-B 监视范围内目标规划到 26 个区域，对于每一个区域中目标与本机的相对运动状态根据设定的规则判断相关性，不同区域对应不同判别规则，相关目标与无关目标区分显示，无关目标不参与本机相关的冲突检测等后续处理，减少本机评

估周围交通安全时的运算量，同时仪表上区分显示能增强视觉效果。本文算法坚持“宁可虚警、不可漏警”原则，确保安全至上，最后通过蒙特卡罗实验检验了过滤算法的各项性能。实验结果显示超过 30% 的目标被过滤，说明本文算法是必要的；算法检测结果与理论分析的结果完全一致，同时针对每一区间的蒙特卡罗验证结果进一步说明本文算法是有效可靠的。由于本文算法大部分是逻辑判断，计算时间非常短并做了验证统计，不会影响目标后续的实时处理。

参考文献

- [1] RODRIGUES C V C, SILVA J M R, BOUSSON K. Advanced air traffic management technologies; the ADS-B impact over ATM concepts. The case for portugal[J]. International Journal of Aviation Management, 2012, 1(3): 162-180.
- [2] Joint Planning and Development Office. Concept of operations for the next generation air transportation system[Z]. 2007.
- [3] ERZBERGER H. Transforming the NAS: the next generation air traffic control system[R]. Moffett Field: Ames Research Center, 2004.

(下转第 74 页)

- image analysis and automated cartography[J]. *Graphics and Image Processing*, 1981, 24(6):381-395.
- [21] 侯晓丽. 基于局部特征的图像匹配算法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2014.
- [22] CHUM O, MATAS J, KITTLER J. Locally optimized RANSAC[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2003, 2781:236-243.
- [23] XU M, LU J. Distributed RANSAC for the robust estimation of three-dimensional reconstruction[J]. *IET Computer Vision*, 2012, 6(4):324-333.
- [24] HAST A, NYSJÖ J, MARCHETTI A. Optimal RANSAC-towards a repeatable algorithm for finding the optimal set [J]. *Journal of WSCG*, 2013, 21(1):21-30.
- [25] 于永军,徐锦法,张梁. 惯导/双目视觉位姿估计算法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(10):2170-2176.
- [26] 蔡迎波. 基于多约束的视觉/惯性组合导航算法研究[J]. *光学与光电技术*, 2015, 13(6):58-62.
- [27] 梁昆,杨明,王春香. 基于低精度 GPS 的智能车视觉导航方法[J]. *上海交通大学学报*, 2011, 45(2):168-172.
- [28] 陈明芽. 自然视觉路标辅助的机器人定位技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.
- [29] 李维鹏,张国良,姚二亮,等. 基于空间位置不确定性约束的改进闭环检测算法[J]. *机器人*, 2016, 38(3):301-310.
- [30] 伍梦琦,李中伟,钟凯,等. 基于几何特征和图像特征的点云自适应拼接方法[J]. *光学学报*, 2015, 35(2):229-236.
- [31] 李宇波. 户外环境下移动机器人视觉里程计技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2012.
- [32] RUBLEE E, RABAU D V, KONOLIGE K, et al. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF[C]//*International Conference on Computer Vision*, IEEE Computer Society, 2011:2564-2571.
- [33] ROSTEN E, DRUMMOND T. Machine learning for high-speed corner detection[C]//*Proceedings of the 9th European Conference on Computer Vision*, 2006:430-443.
- [34] NISTÉR D. Preemptive RANSAC for live structure and motion estimation [C]//*IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2003:199-206.
- [35] MATAS J, CHUM O. Randomized RANSAC[Z]. 2002:49-58.
- [36] 卢维. 高精度实时视觉定位的关键技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2015.

(上接第 68 页)

- [4] 何桂萍,徐亚军. 基于 TCAS II 和 ADS-B 的组合监视防撞系统研究[J]. *电光与控制*, 2011, 18(4):61-64.
- [5] PURTON L, ABBASS H, ALAM S. Identification of ADS-B system vulnerabilities and threats[DB/OL]. [2015-12-05]. http://atrf.info/papers/2010/2010_purton_Abbass_Alam.pdf.
- [6] 周波,曹博,唐鹏,等. 基于 ADS-B 的新型跟踪监视算法[J]. *电光与控制*, 2014, 21(7):45-49.
- [7] 沈笑云,周波,曹博,等. 基于概率的低空自由飞行冲突检测算法[J]. *电光与控制*, 2014, 21(6):47-51.
- [8] HAISSIG C M, BRANDAO R. Using TCAS surveillance to enable legacy ADS-B transponder use for in-trail procedures [C]//*Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, 2012:5D5-1-5D5-14.
- [9] DOMINO D A, BATEMAN H, MUNDRA A, et al. CDTI Enabled Delegated Separation (CEDs) in the vertical domain: initial feasibility assessment [C]//*Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*, IEEE, 2012:L3-1-L3-15.
- [10] 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.
- [11] 戴超成. 广播式自动相关监视(ADS-B)关键技术及仿真研究[D]. 上海:上海交通大学,2011.
- [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.