

doi: 10.7690/bgzd.2022.04.004

面向机载态势感知系统的空中目标意图估计

樊 皓

(中国西南电子技术研究所, 成都 610036)

摘要: 针对空中目标的意图估计问题, 建立一种空中目标战术意图估计模型。在现有机载态势感知系统中, 加入空中目标战术意图估计功能, 在机载环境下实时评估敌方空中目标的战术意图, 辅助飞行员进行空战决策; 围绕空中目标战术意图估计模型建立, 运用多粒度模糊贝叶斯网络对目标意图进行估计, 通过仿真实验对改进前后的意图估计效果进行对比。结果表明: 改进后的隶属度函数对目标的意图评估更精确, 能提高实际辅助决策过程中的可参考性, 验证了模型的有效性。

关键词: 空中目标; 态势感知; 意图估计; 模糊贝叶斯网络

中图分类号: TP274; TJ02 **文献标志码:** A

Air Target Intention Estimation for Airborne Situation Awareness System

Fan Hao

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: Aiming at the problem of air target's intention estimation, an air target tactical intention estimation model is established. In the existing airborne situation awareness system, the function of air target tactical intention estimation is added to evaluate the tactical intention of enemy air targets in the airborne environment in real time and assist pilots to make air combat decisions. Around the model of air target tactical intention estimation, the multi-granularity fuzzy Bayesian network is used to estimate the target intention. The simulation results show that the improved membership function is more accurate to evaluate the intention of the target, which improves the reference in the actual decision-making process and verifies the effectiveness of the model.

Keywords: air target; situation awareness; intention estimation; fuzzy Bayesian network

0 引言

空战环境下, 面对空中多个来袭目标, 急需在短时间内正确预判其来袭意图, 并采取相应的攻击、防御或撤退措施。当前对空中多个来袭目标的意图判断, 主要由飞行员根据数据融合提供的综合态势信息进行人为判断, 飞行员在操控飞机的同时, 还需对态势进行分析, 大大增加了飞行员的负担。随着无人机技术、多机协同技术以及有人无人协同等技术的发展, 未来空战面临的态势将越来越复杂^[1], 继续依靠飞行员对空中来袭目标进行意图估计, 将使飞行员不能集中于空战决策; 因此, 急需在现有的机载态势感知系统中, 加入空中目标战术意图估计^[2]功能, 在机载环境下实时评估敌方空中目标的战术意图, 辅助飞行员进行空战决策。

目标意图估计的主要难题是目标意图估计中存在着许多不确定因素^[3]。从现有的理论和应用研究综合来看, 目前主流的目标意图估计方法包括贝叶斯理论、D-S 证据理论、神经网络理论等。文献[4]

基于 D-S 证据理论建立了意图预测模型, 确定敌机意图。文献[5]基于置信规则库和证据推理建立了一种融合目标多源信息的意图识别模型, 对目标意图进行识别。文献[6]基于贝叶斯网络建立了敌我关联网络, 实现反潜目标态势评估。文献[7]提出一种基于直觉模糊集合与贝叶斯网络相结合的意图识别方法。文献[8]基于模板匹配的方法, 实现敌方意图识别的态势预测。文献[9]利用改进的聚类算法和样本扩增技术, 基于神经网络, 实现空中目标意图识别。

运用贝叶斯网络模型进行目标意图估计相比其他方法, 其优势为^[10]: 1) 能充分利用先验知识, 使得推理结论更加易于理解和说明; 2) 采用有向无环图的形式刻画事件之间的逻辑关联关系, 表达方式简捷而清晰; 3) 采用状态概率分布表来刻画逻辑关联事件之间的依赖程度, 通过这种方式, 模型能够区分和量化逻辑事件之间影响关系的强与弱。

笔者面向机载航电系统, 基于机载态势感知系统, 新增空中目标战术意图估计功能, 并针对空中目标的意图估计问题, 运用多粒度模糊贝叶斯网络

收稿日期: 2022-01-27; 修回日期: 2022-02-28

基金项目: 装备预研项目(41413040201)

作者简介: 樊皓(1990—), 男, 云南人, 博士, 工程师, 从事机载传感器管理研究。E-mail: fhfhf1990yn@sina.com。

建立空中目标战术意图估计模型，有效地辅助飞行员进行空战决策。

1 机载空中目标战术意图估计功能

根据美军提出的态势感知三级模型^[11]，修改的机载态势感知系统如图 1 所示，分为感知、理解和预测 3 个阶段。感知阶段通过机载各传感器子系统获取本机航迹、目标航迹、目标敌我属性、目标识别等信息。理解阶段通过数据融合形成统一的航迹态势信息，通过综合识别形成统一的敌我属性、类型、型号信息，该阶段为现有的机载态势感知系统。

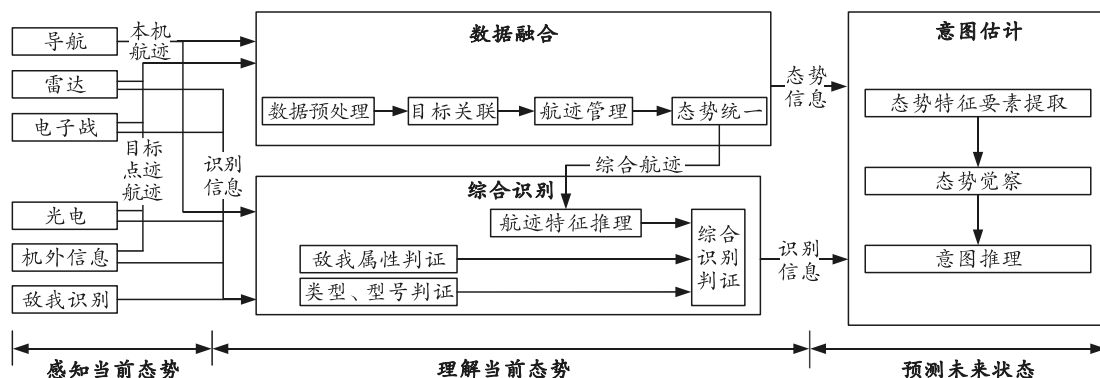


图 1 机载态势感知系统

2 空中目标战术意图估计模型

为解决空中目标意图估计问题，拟采用多粒度模糊贝叶斯网络方法。模糊贝叶斯网络是在贝叶斯网络的基础上构造出来的，其核心是贝叶斯理论，贝叶斯公式表达如下：

$$P(X|Y) = P(Y|X) * P(X) / P(Y) = P(XY) / P(Y) \quad (1)$$

其中： X 和 Y 为 2 个不同的随机事件； $P(X)$ 、 $P(Y)$ 为事件 X 、 Y 发生的概率； $P(X|Y)$ 、 $P(Y|X)$ 为事件发生的条件概率； $P(XY)$ 为事件 X 和 Y 发生的联合概率。

假定 X 中的状态可被模糊化为模糊变量 $\{x_1, x_2, \dots\}$ ，其隶属函数可表示为 $u_{x_i}(X)$ ，则模糊事件 x 的概率定义为

$$P(x_i) = \int u_{x_i}(X) dP \quad (2)$$

根据全概率公式，可推导模糊全概率公式也成立，即：

$$P(Y) = \sum_{i=1}^n P(Y|x_i)P(x_i) \quad (3)$$

结合式(1)、(3)，可推导模糊贝叶斯公式成立：

$$P(x_i|Y) = \frac{P(x_i Y)}{P(Y)} = \frac{P(Y x_i)}{P(Y)} = \frac{P(Y|x_i)P(x_i)}{\sum_{j=1}^n P(Y|x_j)P(x_j)} \quad (4)$$

预测阶段通过态势特征要素提取、觉察，推理出目标的意图，此阶段为新增功能。

数据融合^[12]处理分为数据预处理、目标关联、航迹管理和态势统一 4 个阶段，将输入的传感器数据生成最终的统一态势。

综合识别^[13]处理分为敌我属性判证、类型/型号判证、航迹特征推理和综合识别判证，形成统一的属性判证结果。

意图估计处理分为态势特征要素提取、态势觉察和意图推理，通过对当前环境态势的觉察和理解，预测目标的战术意图。

构建贝叶斯网络通常需要 3 个步骤^[14]：首先是确定节点及节点状态；其次是网络拓扑结构构建；最后是节点概率分配。

2.1 网络节点及节点状态

网络节点代表为估计空中目标战术意图可能发生的事件，每个事件具有多种情况，每个情况之间相互独立。围绕动态威胁、静态威胁以及告警信息等因素，建立各网络节点。

本文中各节点状态大都是多粒度模糊状态，文献[15]构建了梯形隶属度函数来描述各模糊状态的隶属度，但根据一般规律，元素取值越靠近模糊状态边界时，其隶属程度会加剧倾向该模糊状态。笔者提出的隶属度函数如下：

$$g_i(x, a_i, b_i, c_i, d_i) = \begin{cases} 0, & x < a_i \\ ((x - a_i) / (b_i - a_i))^2, & a_i \leq x < b_i \\ 1, & b_i \leq x < c_i \\ ((d_i - x) / (d_i - c_i))^2, & c_i \leq x < d_i \\ 0, & x \geq d_i \end{cases} \quad (5)$$

式中 i 为第 i 个模糊状态的隶属函数，该式求得隶属度还需进行归一化处理。假设某特征状态集合 $M = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$ ，通过隶属函数计算得到的隶属

度为 $G = \{g(m_1), g(m_2), \dots, g(m_k)\}$ ，归一化处理得到新隶属度为 $\tilde{G} = \{\tilde{g}(m_1), \tilde{g}(m_2), \dots, \tilde{g}(m_k)\}$ ，其中：

$$\tilde{g}(m_k) = g(m_k) / \sum g(m_i) \quad (6)$$

经分析可知，通过归一化处理，每个元素都满足：

$$0 \leq \tilde{g}(m_k) \leq 1, k = 1, 2, \dots, K; \quad (7)$$

$$\sum \tilde{g}(m_k) = 1, k = 1, 2, \dots, K. \quad (8)$$

下面对有多粒度属性的节点，采用笔者提出的隶属度函数来描述，直向我方、偏向我方、与我方保持、偏离我方、远离我方属性，参数 $[a, b, c, d]$ 取值分别为 $[100, 160, \infty, \infty]$ 、 $[85, 115, 135, 160]$ 、 $[60, 80, 100, 120]$ 、 $[20, 45, 65, 95]$ 、 $[-\infty, -\infty, 20, 80]$ ，单位为 $^\circ$ ，其隶属曲线如图 2 所示。

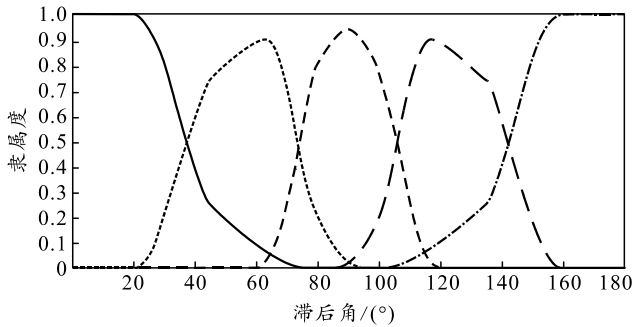


图 2 航向隶属曲线

速度的快、中、慢属性参数 $[a, b, c, d]$ 取值分别为 $[735, 1225, \infty, \infty]$ 、 $[490, 735, 980, 1225]$ 、 $[-\infty, -\infty, 490, 857]$ ，单位为 km/h。目标距离的近距离、中距、远距属性，参数 $[a, b, c, d]$ 取值分别为 $[-\infty, -\infty, 50, 100]$ 、 $[50, 80, 150, 200]$ 、 $[130, 200, \infty, \infty]$ ，单位为 km。兵力比占优、相等、劣势属性，参数 $[a, b, c, d]$ 取值分别为 $[-\infty, -\infty, 0.5, 1]$ 、 $[0.5, 0.9, 1.1, 2]$ 、 $[1, 2, \infty, \infty]$ 。位置变化率的逐渐远离、忽远忽近、逐渐靠近等属性，参数 $[a, b, c, d]$ 取值分别为 $[-\infty, -\infty, -0.5, 0]$ 、 $[-0.5, -0.2, 0.2, 0.5]$ 、 $[0, 0.5, \infty, \infty]$ 。

2.2 网络拓扑结构构建

在机载空中目标战术意图估计系统中可通过数据融合获取的目标动态信息、综合识别获取的目标属性信息和机载告警系统的告警信息对敌方目标意图进行估计。首先，通过速度、相对航向、位置变化和距离元素估计目标的动态威胁，通过目标类型、敌我属性和兵力比元素估计目标的静态威胁；其次，通过动态威胁、静态威胁和告警信息估计目标的战术意图。如图 3 所示，在机载系统中构建了两级分层的空中目标战术意图估计网络。

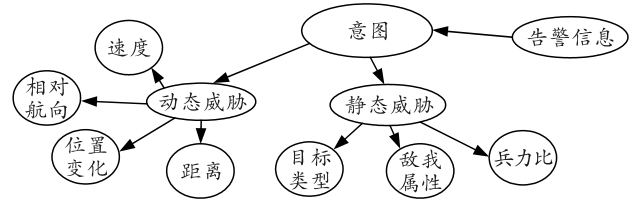


图 3 空中目标战术意图估计模型

2.3 节点概率分配

构建完成网络拓扑结构后，还需对网络参数进行分配，从而完成整个模型的构建。网络参数分配可通过样本学习或专家知识确定。笔者通过专家知识确定各节点的条件概率，请 3 位行业专家对各节点的条件概率进行分配，最后取平均值。在确定每个节点的初始概率之后，就可进行贝叶斯网推理，以获得各节点所有可能状态的概率分布，建立空中目标战术意图估计模型。

首先，确定动态威胁节点的条件概率矩阵，其状态包括高威胁、中威胁、低威胁、无威胁 4 个状态。然后，确定静态威胁节点的条件概率矩阵，其状态包括高威胁、中威胁、低威胁、无威胁。最后，确定空中目标意图的条件概率矩阵，其状态包括攻击、撤退、监视，根据动态威胁、静态威胁和告警信息确定的条件概率矩阵如表 1—3 所示。

表 1 动态威胁条件概率

目标意图	攻击	撤退	监视
大	0.70	0.01	0.1
中	0.20	0.09	0.4
小	0.09	0.20	0.4
无	0.01	0.70	0.1

表 2 静态威胁条件概率

目标意图	攻击	撤退	监视
大	0.55	0.10	0.2
中	0.35	0.15	0.3
小	0.10	0.30	0.3
无	0	0.45	0.2

表 3 目标意图条件概率

告警信息	攻击	撤退	监视
被锁定	1.00	0	0
被跟踪	0.45	0.10	0.45
被搜索	0.20	0.20	0.60
无告警	0.05	0.85	0.10

2.4 空中目标战术意图估计流程

整个空中目标战术意图估计流程如图 4 所示，数据融合提供目标、目标的速度、相对航向、位置、距离以及告警信息，综合识别提供目标的类型和敌我属性信息，先计算兵力比、速度、相对航向、位置变化以及距离属性的模糊属性，然后将所有属性

信息带入构建好的贝叶斯网络中，推理动态威胁和静态威胁属性，最后推理出目标意图，将结果输出。

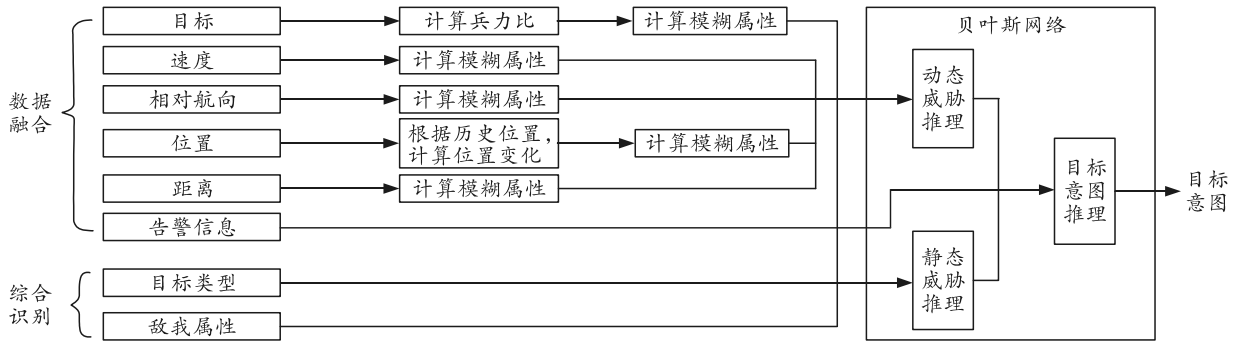


图 4 空中目标战术意图估计流程

3 仿真示例

为验证笔者提出的空中目标战术意图估计模型的有效性，假设我方编队为 4 架无人机，仿真探测

到的编队目标信息如表 4 所示。在 Matlab 平台下，利用贝叶斯网络工具箱，建立空中目标战术意图估计模型，估计目标战术意图。

表 4 仿真目标

编队号	速度/(km/h)	航向/(°)	位置变化	距离/km	目标类型	敌我属性	兵力比	告警信息
1	1 470	160	0.4	100	战机	敌	0.80	被跟踪
2	980	120	0.1	150	无人机	不明		被搜索
3	980	30	-0.3	120		敌	1.00	无告警
4	368	100	-0.1	200	预警机	敌	0.25	被搜索
5	735	140	0.3	60		敌	1.00	被锁定
6	613	90	-0.1	150		不明		被搜索
7	735	60	-0.3	100	无人机	敌	1.00	被跟踪
8	980	40	-0.5	120	战机	敌	0.50	被搜索
9	1 593	145	0.4	200	战机	敌	1.00	被搜索
10	735	90	0.1	100	无人机	友	2.00	无告警

以编队 2 为例，根据输入信息，首先计算其速度、航向、位置变化、距离的隶属度，计算结果如表 5—8 所示，将所有元素输入建立的贝叶斯网络中，利用联合树推理引擎(jtree_inf_engine)，推理得到动态和静态威胁属性如表 9—10 所示，最后推理出编队 2 的目标意图。

表 5 编队 2 的速度隶属度

快	中	慢
0.2	0.8	0

表 6 编队 2 的相对航向隶属度

直向我方	偏向我方	与我方保持	偏离我方	远离我方
0.1	0.9	0	0	0

表 7 编队 2 的位置变化隶属度

逐渐远离	忽远忽近	逐渐靠近
0	0.961 5	0.038 5

表 8 编队 2 的距离隶属度

近距	中距	远距
0	0.924 5	0.075 5

表 9 编队 2 的动态威胁

高	中	低	无
0.076	0.702 8	0.210 2	0.011

表 10 编队 2 的静态威胁

高	中	低	无
0.111 9	0.444 7	0.422 2	0.021 1

所有编队的目标意图仿真结果如表 11 所示，仿真结果同时对比了隶属度函数和梯形隶属度函数的区别。

从仿真结果中可看出：相比于梯形隶属度函数，笔者提出的空中目标战术意图估计模型能有效评估出敌方空中目标的作战意图，隶属度函数对目标的意图评估更精确，预测概率能提高至少 2%。

4 结论

针对空中目标意图估计问题，在现有的机载态势感知系统中，结合美军提出的态势感知三级模型，加入空中目标战术意图估计功能，在机载环境下实时评估敌方空中目标的战术意图，辅助飞行员进行空战决策。围绕空中目标战术意图估计的模型建立，运用多粒度模糊贝叶斯网络及改进的隶属度函数，对空中目标意图进行估计。通过探测到的空中目标信息进行仿真，对模型的有效性进行了验证。验证结果表明：相比改进前的隶属度函数，改进后

的隶属度函数对目标的意图评估更精确。利用笔者设计的机载态势感知系统和空中目标战术意图估计

模型，可提高机载环境下的意图推理结果在实际辅助决策过程中的可参考性。

表 11 编队目标的意图估计仿真结果

场景	攻击		撤退		监视		意图提升	
	本文中	梯形	本文中	梯形	本文中	梯形	提升项	提升性能/%
1	0.832 0	0.812 6	0.004 0	0.004 8	0.164 1	0.182 6	攻击	2.39
2	0.130 9	0.162 6	0.013 8	0.014 1	0.855 3	0.823 3	监视	3.89
3	0.021 6	0.023 9	0.879 0	0.862 0	0.099 4	0.114 1	撤退	2.00
4	0.035 1	0.034 7	0.053 5	0.076 2	0.911 4	0.889 1	监视	2.51
5	1.000 0	1.000 0	0	0	0	0	无	-
6	0.076 9	0.077 3	0.026 5	0.044 2	0.896 6	0.878 5	监视	2.06
7	0.206 4	0.197 3	0.128 4	0.155 7	0.665 1	0.646 9	监视	2.81
8	0.061 7	0.064 5	0.614 8	0.582 8	0.323 5	0.352 7	撤退	5.32
9	0.524 1	0.472 7	0.026 7	0.034 8	0.449 2	0.492 4	攻击	10.87
10	0	0	0.245 4	0.268 6	0.754 6	0.731 4	监视	3.17

参考文献:

[1] 李腾. 有人/无人机协同编队控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.

[2] 范瀚阳. 基于航迹信息的空中目标战术意图稳健估计方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.

[3] 王昊冉, 老松杨, 白亮, 等. 基于MEBN的战术级空中目标意图识别[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(10): 133-138.

[4] 王小平, 夏命辉, 林泰颖, 等. 接敌前基于D-S理论的空战意图预测[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(9): 185-187.

[5] 赵福均, 周志杰, 胡昌华, 等. 基于置信规则库和证据推理的空中目标意图识别方法[J]. 电光与控制, 2017, 24(8): 15-19.

[6] 李涛, 张刚, 成建波. 采用贝叶斯网络的应召反潜目标态势评估[J]. 电光与控制, 2019, 26(6): 40-44.

[7] 王海旺, 史红权, 李晓丹. 基于直觉模糊集和贝叶斯推理的意图识别方法[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(6):

42-45.

[8] 尹江丽, 郭效芝. 空天态势推演与预测分析方法[C]. 第19届中国系统仿真技术及其应用学术年会, 2018.

[9] ZHANG Z, QU Y, LIU H K. Air Target Intention Recognition Based on Further Clustering and Sample Expansion[C]. 37th Chinese Control Conference, 2018.

[10] 葛顺. 基于规则发现和贝叶斯推理的战术意图识别技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.

[11] 赵宗贵, 李君灵, 王珂. 战场态势估计概念、结构与效能[J]. 中国电子科学研究院学报, 2010, 5(3): 226-230.

[12] 贺雅琪. 多源异构数据融合关键技术研究及其应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.

[13] 吴耀云, 游屈波, 黄静, 等. 机载目标综合识别技术概述[J]. 电子信息对抗技术, 2019, 34(5): 1-4.

[14] 朱波, 方立恭, 张小东. 基于贝叶斯网络的空中目标意图识别方法[J]. 现代防御技术, 2012, 40(2): 109-113.

[15] 丁达理, 罗建军, 王铀, 等. 基于模糊贝叶斯网的威胁等级评估研究[J]. 电光与控制, 2014, 21(9): 7-15.

(上接第 13 页)

[6] 柳维旗, 苏振中, 姜志保, 等. 底火输出能量量化测试系统: CN, 102192691A[P]. 2011-09-21.

[7] FRANK J V. Comparison of Several Techniques to Evaluate Percussion Primer Performance [C]. Twentieth International Pyrotechnics Seminar, Westminster, Colorado, 2002.

[8] PRICE E W. Hot Stage Microscope Studies of Decomposition of Propellant Ingredients[C]. Proceedings of 30-th JANNAF Combustion Meeting, 1993.

[9] 李浩德, 安自朝, 王成. 大口径枪弹用底火输出能力测试研究[J]. 火工品, 2006(1): 29-31.

[10] 柳维旗, 蔡瑞娇, 温玉泉, 等. 底火输出压力温度测试系统[J]. 测试技术, 2007, 21(5): 377-381.

[11] 李博, 庄弘炜, 张蕊. 一种撞击底火输出性能的试验平台[J]. 火工品, 2014(6): 44-46.

[12] 彭加斌, 魏领, 王雪艳, 等. 一种无起爆药撞击火帽的输出特性[J]. 含能材料, 2019, 27(9): 779-785.

[13] 王来芬, 万学仁, 伊芳, 等. 随弹小底火测试装置设计和试验[J]. 火炸药学报, 2001(4): 52-53.