

防空态势评估系统分析及新型评估模型研究

王玉惠^{1,2} 韩占朋³ 陈哨东² 王文敬² 张洪波²

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京, 210016; 2. 光电控制技术重点实验室, 洛阳, 471009;

3. 江西洪都航空工业集团 650 设计所, 南昌, 330024)

摘要: 态势评估是一个时敏、不确定的动态过程。为了正确评估态势、深刻认识评估过程, 首先详尽分析了评估所需的 18 项威胁因子及其作用原理, 利用高斯函数将数据模糊化并给出复杂威胁因子的贝叶斯推理模型。在此基础上提出一个优势互补的二级态势评估模型: 远方目标未知信息较多时, 依照关联规则假设重要未知信息, 预测目标的威胁程度; 信息完备时使用贝叶斯网络推理, 具有更强的可信度。最后, 实例仿真验证了该评估模型的正确性及合理性。

关键词: 防空作战; 关联规则; 贝叶斯网络; 威胁因子; 辅助决策系统; 态势评估

中图分类号: E833; TP391; V245

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2014)04-0558-09

Analysis and Modeling of Threat Evaluation System in Air Defense Operations

Wang Yuhui^{1,2}, Han Zhanpeng³, Chen Shaodong², Wang Wenjing², Zhang Hongbo²

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. Science and Technology on Electro-optic Control Laboratory, Luoyang, 471009, China;

3. No. 650 Institute, AVIC Jiangxi Hongdu Aviation Group Co. Ltd., Nanchang, 330024, China)

Abstract: Threat evaluation is a time-sensitive, uncertain and dynamic process. In order to access a profound understanding, a detailed description of 18 threat cues essential in the assessment process is given firstly. And Gaussian function is used as fuzzy membership function to deal with data required. At the same time, Bayesian network structure is designed for complex threat factors. Then a two-stage evaluation structure based on the above description is proposed; Important information unknown about distant target is speculated based on the association rules and then average linear weighted method is used on the parameters to get the assessment results; Bayesian network is used when information is complete. Finally simulation results verify the validity and rationality of the model.

Key words: air defense; association rules; Bayesian networks; threat cues; decision support systems; threat evaluation

态势评估(Threat evaluation, TE)和火力分配(Weapon assignment, WA)是研究军事辅助决策系统的两大关键问题(TE & WA, TEWA)^[1]。美伊战争中, 美军接连发生两起指挥官对目标威胁的误判事件^[2]促使美军军事思想变革, 提出态势估计的概

念, 目的是正确判断目标威胁程度, 避免误判引起与友方或中立方的交火。目前对 TE 问题的认识尚不统一, 比较权威的是美国国防部联合领导实验室数据融合小组提出的数据融合处理模型, 明确地将态势和威胁评估作为 2 级和 3 级融合处理的内容: 将

基金项目: 国家自然科学基金(11102080, 61374212)资助项目; 航空科学基金(20135152047)资助项目; 中央高校基本科研业务费专项资金(NZ2012005)资助项目。

收稿日期: 2013-01-27; **修订日期:** 2013-10-22

通信作者: 王玉惠, 女, 副教授, E-mail: wangyh@nuaa.edu.cn。

来自许多传感器和信息源的数据和信息加以联合、相关和组合以获得精确的位置估计和身份估计,以完成对战场态势和威胁及其重要程度进行实时、完整的评价处理过程^[3]。基于上述定义,态势是所有目标威胁评估结果的集合,是目标威胁及重要程度的总体涌现,因此一般将态势评估与威胁估计视为同一问题。

目前国内态势评估问题尚处于理论探索阶段,主要集中在评估方法的研究及框架的构建,甚少涉及到整个评估过程,且存在以下缺点:评估少量目标时结果很不理想,甚至不能对单目标实施评估^[4-7];选取威胁因子(评估指标)类型较随意,变化多样且不全面,多建立在对该问题的直观认识,与实际情况存在差距^[5-8];评估大都基于某一时间点,缺乏系统性的过程分析及认识,将目标抽离成静态对象而忽略了动态目标的威胁变化及其影响;另外,在未知信息及矛盾信息的处理方面尚无相关研究。

基于以上问题,本文在明确态势评估功能需求的基础上,给出评估当前态势所需的威胁因子并采用模糊方法将数据模糊化处理。然后重点分析威胁因子的作用方式及机理。在此基础上提出二级态势评估模型:第一级评估为不确定性模拟预测,采用关联规则处理未知信息;第二级评估为概率推理,采用贝叶斯网络评估信息完备时的目标威胁程度。

1 整体认知

从防空作战过程来看,态势评估是对目标打击能力和意图的综合判断,一般而言可将该过程分为目标探测、追踪、识别、威胁估计及火力分配5个部分:前3部分属于信息融合第一阶段,目前发展已经比较成熟;后2部分(高级融合)还处在进一步的发展研究中^[9]。

从数据的流动方面来看可以用加入局部反馈的OODA(Observe, orient, decide & act)环来表示TEWA过程,如图1所示。同时该过程可视为中大规模作战下的循环打击模型^[10]。

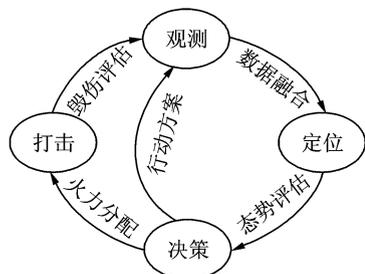


图1 TEWA下的OODA环

Fig.1 OODA loop for TEWA

图1中特别加入了决策阶段到观测的反馈,用以观测目标对我方行动方案的反应,可进一步确定目标的意图。

基于以上过程,可明确基于防空作战的态势评估系统需满足的功能性要求:结合相关数据库(如机载武器库、飞机类数据库等)识别目标身份,进而评估其意图及能力以确认该目标对防区内防御对象(Defended assets, DA)的威胁程度;在决策阶段正确判断态势并生成行动方案;执行方案、反馈行动结果再次评估目标威胁,必要时与目标交战^[11]。由此也可看出态势评估是开展任何军事行动的前提,要正确评估态势首先要将来袭目标各项因素量化为评价指标,即下文所述之威胁因子。

2 防空态势评估系统分析

防空态势评估的观测阶段主要通过防空区域内的传感器及雷达实时探测目标^[12],信息经过融合后可得到各项威胁因子原始数据。根据 Liebhauer 教授等进行的一系列相关实验^[13-15],析出基于防空作战判断态势所需的18项威胁因子,依据使用频率筛选出最常用的6项,按重要程度分别是:身份、IFF(Identify friend or foe)、情报、高度、航线及ESM(Electronic support measure)。在实际评估时可根据目标类型选取不同的威胁因子,如商用飞机只需选取其中的7项,即最重要的6项因子加上速度,而军用飞机基本用到所有的威胁因子^[14]。这样通过探测到的数据判断目标的能力及意图,从而建立最终的态势。

2.1 作用机理分析

目标能力由目标平台类型及其打击能力构成,作战过程中主要依靠ESM、目标速度、机翼、武器包络等几项因子通过身份识别及相关航空兵器数据库来判断。ESM根据探测到的目标反射雷达截面积(Radar cross-section, RCS)、雷达信号波束特征、红外特性、电子干扰活动再加上目标速度可推断出目标类型,诸如轻、重型战斗机、地面攻击机、轰炸机、运输机、强击机等。对应目标平台类型通过查找数据库内的各目标平台指标,如区位适应性、机动性、射击能力(包括杀伤率、开火速率、拦截包络)及气候适应性等可得到目标平台的综合能力。另外平台威胁本质上是其携带的武器的威胁,必须推测目标平台所携带的武器类型。机翼反射的RCS可确定目标是否携带武器,对目标携带的武器的杀伤力评估涉及的内容较多、指标各不相同,具体可参看文献^[16]。由此得到目标在武器包

络内的打击能力。综合这两方面的信息可以得到当前状态下目标综合能力的总体评估。

目标意图的评估较难实现,这是由于目标人为反应的不确定性、作战多样性使得意图评估成为一个半结构化问题,采用模板或其他结构化方法单纯根据目标运动状态及与保卫对象之间的关系确定目标的真实意图(攻击、侦查、护航等)难以实现,这就要求采用具有智能推理特性的方法进行半结构化推理,下文将具体介绍推理算法。图2给出了半结构化推理目标意图所需的指标。

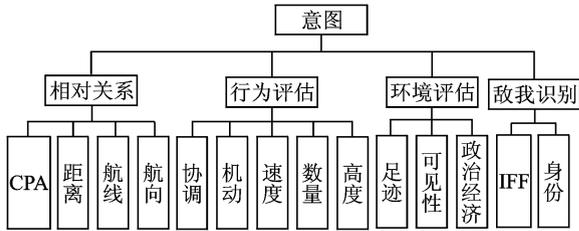


图2 意图评估与威胁因子关系

Fig. 2 Relationship of intention assessment and threat factors

图中各指标均在一定程度上反应了目标的意图^[17],为了方便分析分为敌我识别、环境评估、行为评估及相对关系4方面:

(1)敌我识别是对每个目标识别归属阵营。IFF模式可反映敌我关系,但需注意商用飞机未装备电子应答系统,因此返回的IFF模式只能确定目标是否属于己方阵营。

(2)环境评估主要指当前的政治经济及交战环境(可见性、海、陆地作战)的影响。实验表明外部政治经济环境对目标威胁有积极影响^[18],即紧张环境下(战争时期)对目标的威胁评估值总是高于宽松环境(和平时期)。可见性会影响到武器系统发挥的效能,如雨天会缩短雷达的探测距离。足迹显示目标的来源地,当值为water时显示目标来自海外国家,其威胁比国内起航的飞机要大。

(3)目标行为主要指目标本身的飞行状态包括高度、速度、机动动作(加速、拐弯、爬高、俯冲等)、目标数量及相互通讯状态。

(4)相对关系主要指目标与DA之间的时空关系,包括航向、距离、CPA、航线、武器包络。下面结合相对关系与机动动作以战斗驼峰俯冲攻击^[19]为例说明一般作战样式,如图3所示。

图中攻击圈为估测目标武器的攻击范围。目标开始为躲避雷达探测以低空飞行姿态接近DA,距离一定范围时开始爬高,过顶点后进入攻击圈,实施低

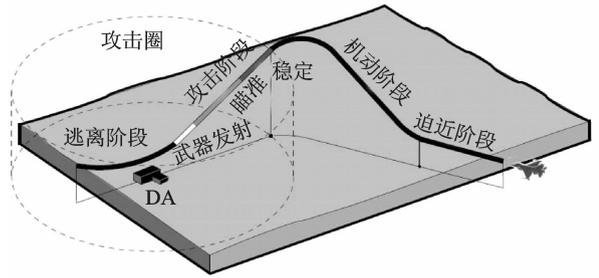


图3 战斗驼峰俯冲攻击

Fig. 3 Hump dive attack

空轰炸后逃逸。整个过程分为接近策略(迫近阶段)及攻击策略(机动阶段、攻击阶段及逃离阶段),其中攻击阶段又可细分为稳定阶段、瞄准、武器发射3个阶段。接近策略是目标接近要摧毁的DA的方式,一般有低空飞行、伪装(沿商用航线飞行)。前者利用地球曲率与雷达探测形成的死角接近目标,后者利用已发布的航线伪装成民用机接近目标。在攻击策略方面,图3即为典型的攻击策略,实战经验表明目标在实施攻击前总是伴随着较大的动作^[20-21],如急转弯、俯冲等,当DA在目标武器包络内时,可将此类机动视为对方开始攻击的标志。

除却以上目标能力与意图的评估外,Steinberg教授提出将目标的打击机会作为态势评估的一部分^[22],尤其是对导弹类目标的评估。相关指标可从天气、弹道计算及目标动态模型方面考虑,这里不再具体讨论。

2.2 数据处理

上文给出了态势评估所需的威胁因子,但要利用各目标属性值作半结构化推理需要经过数据处理。由于模糊原理接近人对事物相对程度的认识^[23],且能够与下文给出的贝叶斯方法融合,因此这里主要采用高斯函数将数据模糊化处理。下面给出最重要的6项威胁因子的模糊化方法:

(1)身份:指目标起飞的地点(国家)。当目标在视距范围(大约8 km)内时,根据目标标识及其机身涂色可确认其归属国,但当目标超过视距时一般很难确定。将其量化为敌方0.8,中立方0.5,友方0.2三类。

(2)IFF模式:敌我识别系统,作用距离一般小于50 km。这里设定为Yes(0.2),No(0.8)两种情况分别表示友军及非友军。上文已提到有些商用飞机没有装备电子应答系统,因此当目标无反应时不能判断目标是否属于客机或军用机,需采用其他方法进一步确认。由于军用机更加注重隐身性能,其RCS值一般要比商用机的RCS值大很多,因此

可以根据目标反射的 RCS 值及其尺寸特性推测目标归属,设计贝叶斯推理结构如图 4 所示。

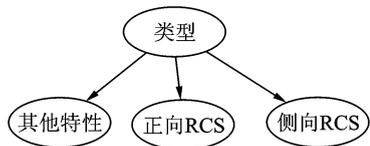


图 4 目标敌我属性推理结构

Fig. 4 Reasoning structure for properties of friend or foe

图 4 中类型表示飞机属性,分为军用、商用两种;侧向 RCS 表示目标侧向的 RCS 值,单位 m^2 。根据目标侧向反射的 RCS 大小划分成小、中、大 3 个区间,区间值为 $(0, 150)$, $(50, 350)$, $(250, 400)$ 。模糊化公式如下

$$\mu(RS) = \begin{cases} \frac{1}{1 + \left| \frac{x - 34}{72} \right|^{2 \times 8.25}} & x \in (0, 150) \\ \frac{1}{1 + \left| \frac{x - 205}{100} \right|^{2 \times 12.25}} & x \in (50, 350) \\ \frac{1}{1 + \left| \frac{x - 365}{62} \right|^{2 \times 8.5}} & x \in (250, 400) \end{cases} \quad (1)$$

正向 RCS 表示目标正向反射 RCS,划分区间分别为 $(0, 4)$, $(4, 15)$, $(15, 100)$,其模糊化公式与式(1)相似,这里不再给出。其他特性表示采用其他手段探测到的目标特性,如红外特性。

情报涉及的内容多、范围广,并且一般以自然语言描述,难以定义,这里给出一种极简定性描述,将情报分为威胁(0.8)、非威胁(0.2)两种情况。ESM 根据雷达反射判断目标雷达类型,进而推断目标平台类型。与情报相似,这里将雷达信息分成商业雷达(0.2),侦查雷达(0.65),火控雷达(0.85)三种。其他因子如足迹、目标数量、协调、机翼、可见性等可参照上述方法得到模糊值。

目标高度可直接进行模糊化处理,其模糊化公式为

$$\mu(H) = \begin{cases} \frac{1}{1 + \left| \frac{x - 105.8}{6300} \right|^{2 \times 8.7}} & x \in (0, 10\ 000) \\ \frac{1}{1 + \left| \frac{x - 13\ 250}{4\ 680} \right|^{2 \times 2.6}} & x \in (0, 30\ 000) \\ \frac{1}{1 + \left| \frac{x - 43\ 900}{22\ 050} \right|^{2 \times 10.5}} & x \in (15\ 000, \infty) \end{cases} \quad (2)$$

图 5 为高度的模糊化结果,由图可见当高度大于 25 000 ft(7 700 m)时快速达到 1,在 $(20\ 000, 25\ 000)$ 区间内变化尤为明显,这与实际情况下飞机实际飞行高度大于 23 000 ft 为高空相符。其他威胁因子如速度、距离、CPA、航向等可以此类推。

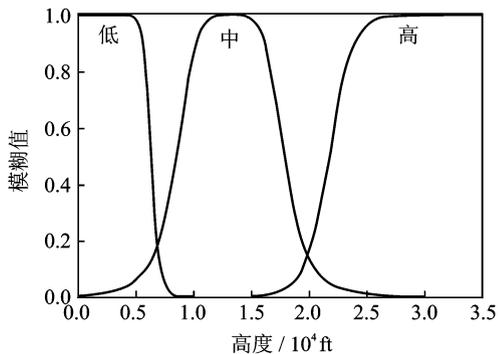


图 5 高度模糊化结果

Fig. 5 Fuzzification result of height

航线的计算比较复杂,需要考虑高度、与空中走廊中心线的相对航向角、与前一架飞机飞行的时间间隔及与接近规定的空中走廊中心线的程度。一般认为航迹与规定航线平行,与航线中心线偏离不超过 10 海里,飞行高度超过 25 000 ft 及以上即可认为目标正常。同 IFF 相似,依然采用贝叶斯网络推理求得航线模糊值。篇幅关系这里仅给出推理结构图,如图 6 所示,不再给出具体量化函数。

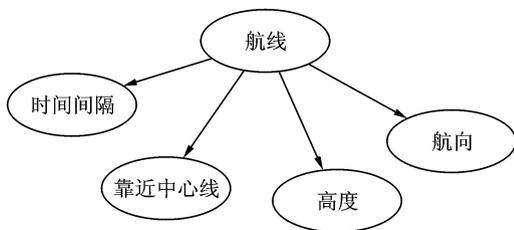


图 6 航线的贝叶斯网络结构

Fig. 6 Bayesian network structure of routes

综上所述,本文详细说明了态势评估所需的最重要 6 项威胁因子、作用方式及其模糊化。但评估过程是一个动态的、非线性的随机性过程,因此将动态集成在评估中是必要的。下面将给出一种具有动态特性的评估算法。

3 二级态势评估模型研究

威胁评估是预测特定目标相对于保护对象的威胁程度。由于整个过程是随着时间逐步推进的,目标的各类属性值不可能同时得到,这就需要在确定目标威胁前需采取各种评估技术及应对方案以

确认目标威胁程度。在 Klein 教授等主导的 TADMUS 工程^[18]中,详细描述了在指挥控制过程中用到的诊断决策及行动方案,这里将诊断决策具体化,在综合前人的研究成果的基础上提出一种二级态势评估模型,并将目标对我方行动方案的反应纳入评估过程中。这与 JN Roux 教授^[19]的“评估判定是一个从简单到复杂的过程,有必要由多级评估组成,从定性到定量反映当前的态势”的想法不谋而合。下面具体介绍评估方法。

3.1 第一级评估模型

二级评估模型的第一级评估为不确定性模拟预测。主要用于评估远方目标未知信息较多的情况。模型基于关键威胁因子的关联规则,从一致性方面评估目标的威胁程度。

在战场上总是可以得到目标高度、航线、及速度的相关信息,而身份、IFF、情报、ESM 等由于设备使用限制或干扰无法得到而变为未知信息。在评估过程中,为了避免未知信息的证据稀释作用需做出一定假设。由于身份、IFF 与情报具有一致性,即当身份鉴别为敌方时,IFF 结果必定为 No。但身份为中立时,IFF 与情报信息可取任意状态值。因此为了避免这三项因子冲突,设计关联规则如下

$$\begin{cases} (V_{\text{origin}} + V_{\text{iff}} + V_{\text{intelligence}})/3 > a \\ (V_{\text{origin}} + V_{\text{iff}} + V_{\text{intelligence}})/3 < b \end{cases} \quad (3)$$

式中: V_x 表示威胁因子 X (身份、IFF、情报) 的模糊值; a, b 是与这三项因子模糊量有关的设计参数,这里 a 取值 0.65, b 取 0.35。当推测未知信息时必须满足上述约束条件之一。这确保了这三者之间取值的一致性。

与之相似,ESM 与身份具有一定的关联性,关联规则如下

$$\begin{cases} (V_{\text{origin}} + V_{\text{esm}})/2 < p \\ (V_{\text{origin}} + V_{\text{esm}})/2 > q \end{cases} \quad (4)$$

式中: p 取 0.45; q 取 0.55。上述两个关联规则式(3,4)确保了有关联的威胁因子推测结果的一致性。

实验表明目标威胁的大小与目标各项参数超出阈值的程度及数量有决定性关系^[24],即异常参数决定威胁大小。此方法作为第二级评估的辅助,因此采用简单的线性加权法计算目标威胁。分为定性和定量两种,视未知信息的数量而定,当未知信息超过阈值时用定性方法,低于阈值则可定量计算。

定性方面单纯从异常因子数量占总体比例提示决策者目标是否属于潜在威胁,可式(5)计算

$$T_1 = \frac{1}{n} \sum^n \frac{m_{\text{abnormal}}}{m_{\text{normal}} + m_{\text{abnormal}}} \quad (5)$$

式中: T_1 为目标威胁值; $m_{\text{normal}}, m_{\text{abnormal}}$ 为威胁因子正常参数与异常参数的个数; n 为当有未知信息时的 n 种可能结果。

定量是对威胁因子模糊值的计算,可更精确表达目标威胁,按式(6)计算

$$\begin{cases} T_2 = \frac{1}{n} \sum_n \sum_i \omega_i v_i \\ \omega_i, v_i \in (0, 1) \end{cases} \quad (6)$$

式中: v_i 为各威胁因子 i 的模糊值; ω_i 为因子 i 的权重。权重的获取可采用线性拟合的方法。本文希望该方法能够对单个目标进行评估,因此将权值的大小与威胁因子相关联,服从如下思想:正常参数值越大对威胁的贡献越小,权值越小;异常参数值越大,对威胁的贡献越大,权值越大。其值由式(7)给出

$$\begin{cases} \omega_{\text{abnormal}} = v^x e^{x-v/x} \\ \omega_{\text{normal}} = k \times v \log_2 v \end{cases} \quad (7)$$

式中: v 为因子模糊值; x 及 k 为设计参数,可根据目标类型的不同合理选择。另外该方法也可与层次分析法等联合或在大量数据的基础上利用神经网络进行非线性映射。图 7 为当 x 取 8, k 取 1.85 时权重随模糊值的变化情况。

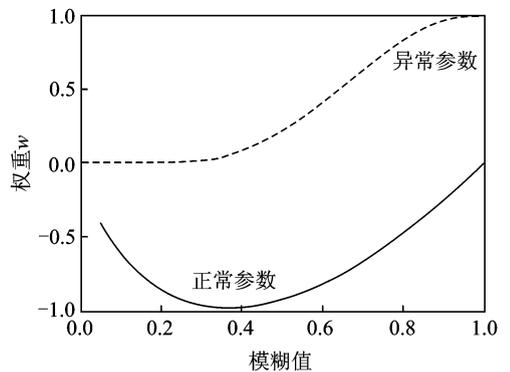


图 7 因子权重

Fig. 7 Factor weights

该方法的优点在于计算简单快速,适用于时敏问题,尤其在大批量目标的处理上有很大优势,且充分考虑目标参数与规定阈值的关系(超过阈值的程度)。另外,合理假设未知信息,可使得评估结果更接近于决策者对当前态势的判断,避免证据稀释作用,致使评估结果产生偏差^[25]。但该方法缺点也很明显:依赖历史数据或经验的准确性,且不能很好地解决各因素在不同状态下的组态问题;其次,模型不能提供目标的各项信息如意图等。

基于以上分析,该方法在信息量少的情况下通过合理假设得到的结果具有较大的不确定性,只能供决策者参考,且决策者可对结果进行修正。

3.2 第二级评估模型

第二级态势评估为精确概率推理,目前此方面较好的算法有基于知识的专家系统^[24]、模糊^[26]、贝叶斯网^[27]等。该级评估要求能够处理不确定性及不完全信息,具有很强的可信度及可操作性、时敏特性。另外其推理过程对决策者是透明的,当决策者对结果产生质疑时需提供强力证据。而基于知识的专家系统不能很好地处理不确定信息^[26],在模糊与贝叶斯方法对比中两者各有优缺点^[28],但从结果的变化层次来看,贝叶斯网络无疑更加接近人的认知过程。另外具有完备的数学理论基础、很好地处理不确定性信息能力、对当前态势进行准确预测及其在人工智能方面的出色应用都将使贝叶斯在将来必有远大前景。

基于 2.1 小节对威胁因子作用机理的分析,这里给出贝叶斯网络的评估结构,如图 8 所示。值得注意的是,这里将目标对我方避战行动做出的反应(忽视、通讯等)加入到评估中。

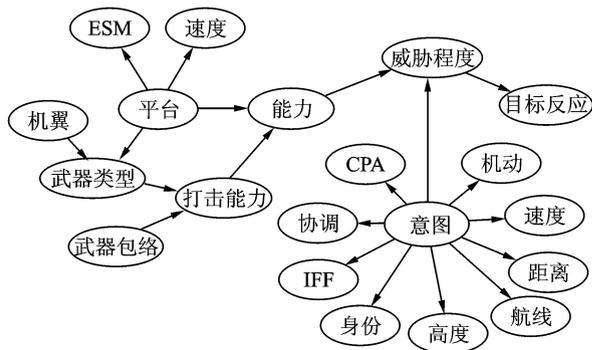


图 8 贝叶斯网络评估结构

Fig. 8 Bayesian network assessment structure

由于贝叶斯推理属于 NP 问题^[29],当变量及其状态较多时,推理时间呈指数级增大。因此采用划分子网方法可将一个大的网络划分成若干子网,如图 8 即为航线的贝叶斯展开结构,这样做的另一个好处是可根据各类型目标建立不同的子网,建立相关数据库,对于战时迅速组网是十分有利的。子网划分及关联方法见文献^[30]。

4 仿真实证

下面分别从虚拟横向与纵向态势场景验证该评估结构的有效性。横向态势:预警机发现距我方保卫对象 300 km 处有一目标正以图中点划线所示的空中走廊飞行,如图 9 所示。此时目标距离较远,信息量较少,采用一级评估预测目标威胁,假定 3 种态势,分别是客机 B757-200、我方预警机 E-2000 及敌方侦察机 E-8。选择最重要的 6 项威胁因子作为评估指标,某时刻得到目标的各项参数如表 1 所示。

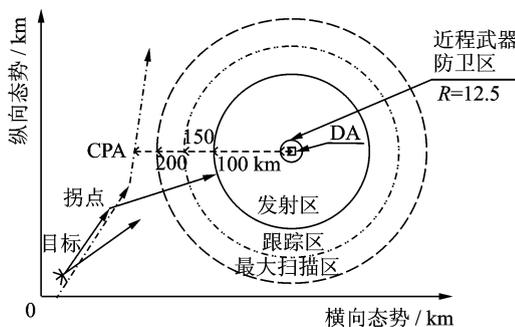


图 9 目标突击示意图

Fig. 9 Attack diagram of target

图 9 中虚线代表我方雷达最大扫描区,双点划线表示开始跟踪目标的最大区域,实线表示我方防御武器的最大打击区,最内层为近程武器防卫区。

表 1 3 种态势下目标突防参数

Tab. 1 Target penetration parameters for three threats

目标	身份	IFF	正向 RCS/ m ²	侧向 RCS/ m ²	情报	高度/ ft	时间间隔/ min	中心距/ (N·m)	航向/ (°)	ESM	速度/ (km·h ⁻¹)
B757-200	None	None	15	600	友	30 000	15	5	5	气象	854
E-2000	友	None	14	500	友	28 500	10	25	30	相控阵	650
E-8	None	None	12	754	无	32 500	15	8	8	APY-3	870

采用一级评估模型计算该目标的威胁,横向比较如表 2 所示。由表 2 可以看出,总体上定性描述与定量计算的结果变化趋势具有一致性;其次未知因素的数量是影响结果变化的主因,未知项越多,结果变化越明显。另外,从 E-8 的评估结果可以看

到未知信息具有很明显的证据稀释作用。

从算法优劣方面来看,该算法能很好地区分客机、我方预警机及敌方侦察机的区别,威胁值的计算结果跨越较明显的区间,尤其定量计算: -0.741, 0.013, 0.896, 达到了较好的区分效果。

表2 评估结果

Tab. 2 Assessment results

目标	比较	B757-200	E-2000	E-8
未知		2	1	3
定性	原值	0.00	0.286	0.20
	预测	0.07	0.250	0.75
定量	原值	-0.536	0.185	0.216
	预测	-0.741	0.013	0.896

注:原值为忽略未知因素;预测值为所提算法评估结果。

另外,从变化趋势来看,对中立方(客机)的评估变化相差不大,对己方飞机的评估略有减小,而对敌机的评估结果数值变化较为明显,与预期结果一

表3 12次采样的目标突防参数

Tab. 3 Target penetration parameters for 12 samples

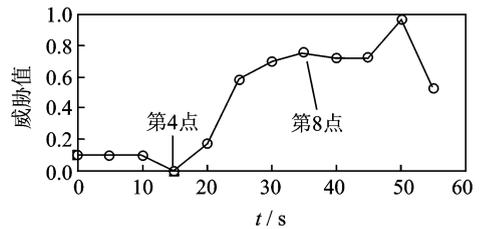
次数	身份	IFF	高度/ ft	航线	ESM	速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	CPA/ km	机动	距离/ km	反应	武器 包络
0	Unknown	None	31 000	On	None	855	>150	Normal	>>200	None	None
1	Unknown	None	31 000	On	None	860	<50	Turn	>>200	None	None
2	Unknown	None	22 000	Off	None	854	<50	Dive	>>200	None	None
3											目标丢失
4	Unknown	None	3 500	Off	None	1 832	<50	Accelerate	200	None	None
5	Unknown	No	1 200	Off	None	1 830	<5	Dive	154	Ignore	None
6	Unknown	No	535	Off	None	1 810	<5	Normal	110	Ignore	None
7	Unknown	No	538	Off	None	1 804	<5	Normal	83	Ignore	None
8	Hostile	No	520	Off	AE	1 840	<5	Normal	50	Ignore	Outside
9	Hostile	No	3 000	Off	AE	1 820	<5	Climb	35	Ignore	Outside
10	Hostile	No	2 500	Off	AE	1 845	<5	Dive	12.5	Ignore	Inside
11	Hostile	No	2 800	Off	AE	1 800	>150	Normal	20	Ignore	Outside

应用图8所示贝叶斯网络结构对该目标进行纵向仿真,推理方法采用团树传播算法,仿真结果如图10所示。

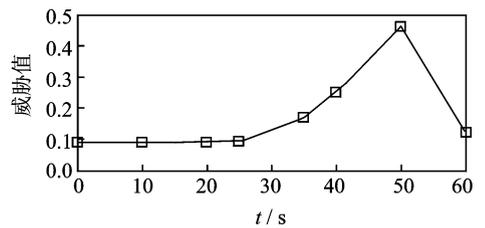
图10(a)为目标为攻击机的仿真结果。从结果来看,在忽略未知信息的前提下,目标开始飞行在国际航线附近,远离军事防区,相关信息不足,威胁程度较小,在第4个点处目标丢失,威胁变为0。而随着目标在拐点转向,超音速飞向我方保护对象时,对我方无线电警告无任何反应,目标由低危目标直接变为高危目标(0.7)。在第8点处,目标开启地空雷达,从而确定目标的类型及武器包络,准确定位了目标的威胁程度,使当前威胁略有减小,但依然处于高危状态。当我方保卫对象处于目标武器包络内时,威胁达到最大值(0.96)。为了便于比较,假设目标仅沿国际航线飞行,其贝叶斯网络仿真结果见图10(b),其威胁在CPA点处达到最大值(0.45),远远小于高危阈值。由此可见该结构能够正确评估当前目标的威胁程度,具有较强的可靠性。

致。通过设定相应阈值可将该目标威胁解模糊化还原为低、中、高威胁中的一类,证明了所提关联规则的有效性及其正确性。

态势二:预警雷达发现该目标以850 km/h的速度不断接近防区外围,并开始跟踪目标,在到达该航线的距离最近DA的CPA前突然转向,并以低空飞行,至此雷达丢失目标。在一段时间后重新定位到同一目标,该目标正在以1 800 km/h的超声速低空姿态突破我防区,做出一系列规避动作并打开空地雷达开始扫描,采用图3所示攻击方式攻击我方DA。对目标采样12次,主要数据如表3所示。



(a) 目标为攻击机仿真结果



(b) 贝叶斯网络仿真结果

图10 贝叶斯仿真结果

Fig. 10 Bayesian simulation results

另外,应用贝叶斯网络的好处是可以观察任何感兴趣节点的变化情况。如图11所示,图中分别

展示了目标在整个攻击过程中意图(打击、侦查、运输)及能力的变化情况。随着目标的临近,目标意图由运输(○线)逐渐向侦查(◇线)方向发展,最后确定为攻击(□线),而目标的打击能力(★线)也逐渐增强。从侧面也证明了该结构的正确性。目标能力随着目标信息的增多,其评估结果越来越大。

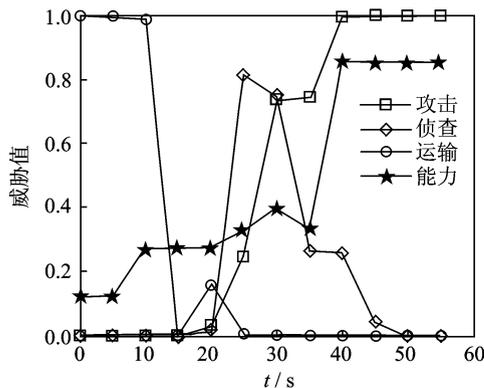


图 11 目标意图及能力变化图

Fig. 11 Target's intention and its variation

将横向与纵向仿真结果合在一起,可得到评估结果但解释不足,而第二级贝叶斯网络需要目标信息量较多,在信息缺失较多时评估结果并不理想,但是能给出任意感兴趣节点的概率解释。因此可将两级评估结合起来,互补长短。甚至可将关联规则直接用于贝叶斯网络,提高对目标的预测的准确度。

由此可见,实例仿真验证了所建模型的正确性。第一级评估可弥补贝叶斯网络在未知信息处理方面的缺点,第二级评估能给出当前态势的多种合理解释并获得任意感兴趣目标信息,互相补充为决策人员提供支持。

5 结束语

态势评估目前还处于不断发展研究中,是一个利用相关算法模拟人判断的过程,自身具有非线性及不确定性。这里以防空作战为背景,介绍了态势评估威胁因子、含义及其可能的取值。然后深入探讨了如何应用威胁因子评估目标意图及能力,给出其相关关系。在此基础上设计了一种二级评估模型,实例仿真充分证明了该算法结构的合理性、实用性。但是态势评估依然很不成熟,尤其在过程认知上,认知粒度尚未深入到各个细节,需进一步细化。在未知信息的处理层面上,学术界未达成共识,研究成果相对稀少,如何避免冲突及对冲突信息的处理将作为下一步的工作。另外,贝叶斯网络

评估特定点结果可能误导决策者,如图 10(a)中归零点,可采用其他算法对结果进行插值优化。

参考文献:

- [1] Paradis S, Benaskeur A, Oxenham M C. Threat evaluation and weapons allocation in network-centric warfare[C]//8th International Conference on Information Fusion. USA: IEEE Press, 2005:25-28.
- [2] Kelly R T, Hutchins S G, Morrison J G. Decision processes and team communications with a decision support system[C]//Proceedings of the Second International Symposium on Command and Control Research and Technology. USA: Naval Postgraduate School, 1996:1-7.
- [3] White F J. Data fusion lexicon, joint directors of laboratories, technical panel for c^3 , data fusion sub-panel[M]. San Diego: Naval Ocean Systems Center, 1987.
- [4] 郭辉,徐浩军,谷向东,等.基于离差最大化的空战目标威胁评估[J].电光与控制,2010,17(9):14-16.
Guo Hui, Xu Haojun, Gu Xiangdong, et al. Target threat assessment for air combat based on maximizing deviation[J]. Electronics Optics & Control, 2010,17(9):14-16.
- [5] 马琳,宋贵宝,吉礼超,等.基于最小二乘灰色关联分析法的目标威胁评估[J].战术导弹技术,2010(1):28-31.
Ma Lin, Song Guibao, Ji Lichao, et al. Evaluation of target threat based on least square gray correlation analysis method[J]. Tactical Missile Technology, 2010(1):28-31.
- [6] 解亮亮,韩林.基于粗糙集的空袭目标威胁评估排序[J].火力与指挥控制,2009,34(9):61-67.
Xie Liangliang, Han Lin. Threat ordering of the air-raid targets threat based on the rough set theory[J]. Fire Control & Command Control, 2009,34(9):61-67.
- [7] Han H C, Huang S C. Aerial targets threat evaluation based on interval-number and entropy-weight analysis[C]//International Workshop on Intelligent Systems and Applications. USA: IEEE Press, 2009:1-4.
- [8] 朱波,方立恭,金钊.基于贝叶斯网络的空中目标威胁估计方法[J].指挥控制与仿真,2011,33(4):29-32.
Zhu Bo, Fang Ligong, Jin Zhao. Research on threat assessment to aerial target based on Bayesian Networks[J]. Command Control & Simulation, 2011, 33(4):29-32.
- [9] Johansson F, Falkman G. SWARD: System for weapon allocation research & development[C]//13th

- Conference on Information Fusion (FUSION). USA; IEEE Press, 2010;1-7.
- [10] Naeem H, Masood A. A two-stage dynamic decision support based optimal threat evaluation and defensive resource scheduling algorithm for multi air-borne threats[C]//IEEE 9th International Conference on Cybernetic Intelligent Systems (CIS). USA; IEEE Press, 2010;1-7.
- [11] Fulford C W. Joint doctrine for countering air and missile threats[M]. U S; Joint Publication, 1999.
- [12] 曹正林, 郑世友, 郑瑶. 基于目标威胁度计算的相控阵快速确认跟踪模式[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(4):475-480.
Cao Zhenglin, Zheng Shiyu, Zhen Yao. Novel target tracking method with rapid confirmation based on threat in airborne phased array radar[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011, 43(4):475-480.
- [13] Liebhaber M J, Feher B. Air threat assessment; research, model, and display guidelines[C]//Proceedings of the 2002 Command and Control Research and Technology Symposium. USA; Naval Postgraduate School, 2002;1-15.
- [14] Liebhaber M, Feher B. Naval air defense threat assessment; cognitive factors and model [C]//Command and Control Research and Technology Symposium. USA; Naval Postgraduate School, 2000;1-30.
- [15] Liebhaber M, Korbus D, Feher, B. Studies of U. S. Navy air defense threat assessment; Cues, information order and impact of conflicting data[R]. SSC-1888, 2002.
- [16] Ball R E. The fundamentals of aircraft combat survivability analysis and design [M]. New York; AIAA, 1985.
- [17] Irandoust H, Benaskeur A, Kabanza F, et al. A mixed-initiative advisory system for threat evaluation [C]//Proceedings of the 15th International Command and Control Research and Technology Smposium. USA; Naval Postgraduate School, 2010;1-20.
- [18] Klein G. Decision making in complex military environments[R]. Technical Report SSC, 1992.
- [19] Roux J N, Van Vuuren J H. Real-time threat evaluation in a ground based air defense environment[C]//Proceedings of the 11th International Conference on Information Fusion. USA; IEEE Press, 2008; 75-101.
- [20] Kaber D B, Boy G, Salvendy G, et al. Advances in cognitive ergonomics [M]. Boca Raton; Taylor & Francis, 2011.
- [21] Liu H, Xu M, Chen N Y. Task effectiveness evaluation on anti-ship attack of fighter aircraft[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 29(2):164-170.
- [22] Steinberg A. Predictive modeling of interacting agents [C]//Proceedings of the International Conference on Information Fusion (Fusion). USA; IEEE Press, 2007;1-6.
- [23] Liang Y W. An approximate reasoning model for situation and threat assessment [C]//Fourth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. USA; IEEE Press, 2007;246-250.
- [24] Liebhaber M J, Feher B A. Surface warfare threat assessment; Requirements definition[R]. SSC-1887, 2002.
- [25] Baranski J V, Petrusic W M. Aggregating conclusive and inconclusive information data and a model based on the assessment of threat[J]. Journal of Behavioral Decision Making, 2010, 23(4):383-403.
- [26] Morrissey D J. A study on the use of fuzzy logic in situation and threat assessment[D]. Canada; Royal military College, 2005.
- [27] Johansson F. A Bayesian network approach to threat evaluation with application to an air defense scenario [C]//Proceedings of the 11th International Conference on Information Fusion. USA; IEEE Press, 2008;1-7.
- [28] Johansson F, Falkman G. A comparison between two approaches to threat evaluation in an air defense scenario[J]. Modeling Decisions for Artificial Intelligence, 2008, 5285:110-121.
- [29] Jordan M I. Learning in graphical models[M]. MA; MIT Press, 1999.
- [30] Das S, Grey R, Gonsalves P. Situation assessment via Bayesian belief networks[C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Information Fusion. USA; IEEE Press, 2002;664-671.

