

基于贝叶斯决策理论的 NSHV 分段建模威胁评估

高天祥, 王 刚, 岳韶华, 肖涛鑫

(空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

摘要 临空高超声速飞行器(Near Space Hypersonic Vehicle, NSHV)具备复杂的运动模式和高动态特点, 传统的威胁评估方法运用于 NSHV 时在评估要素选取和评估动态性等方面存在不足。从 NSHV 的飞行路径入手, 将其划分为 3 个主要的飞行阶段, 通过分析其各阶段运动特点和预警探测、拦截能力等因素, 基于贝叶斯推理、决策理论建立起 NSHV 多阶段威胁评估模型, 并通过先验概率将各阶段进行关联, 保证了评估的继承性, 最终建立典型场景进行仿真验证, 仿真结果反映的威胁变化符合 NSHV 的作战特点和所给观测数据, 证明该方法更适应 NSHV 的动态特性, 能够为指挥员进行防御作战辅助决策提供支持。

关键词 贝叶斯决策理论; 临近空间目标; 威胁评估

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.01.010

中图分类号 TP181 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)01-0060-07

Segmental Modeling Threat Assessment of NSHV Based on Bayesian Decision Theory

GAO Tianxiang, WANG Gang, YUE Shaohua, XIAO Taoxin

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: NSHV has complex motion mode and high dynamic characteristics, and the traditional threat assessment methods applied to NSHV are characterized by some deficiencies in the selection of evaluation and the dynamics of evaluation. The flight path of NSHV is divided into three main flight stages. Through analyzing the movement characteristics of each stage and ability of early warning detection and interception, a multi-stage NSHV threat assessment model is established based on Bayesian inference and decision theory, the evaluation of each stage is correlated with prior probability, ensuring the continuity in the assessment. Finally, a typical scenario is established for simulation verification, the threat changes reflected by the simulation results conform to the operational characteristics and the observed data. The dynamic reflected at every stage shows that the changes of threat at each observation point are more suitable for the dynamic characteristics of NSHV, and for the commanders in making defensive operational support decisions.

Key words: Bayesian decision theory; near space target; threat assessment

威胁评估领域研究的主要评估方法和模型包括 层次分析法、神经网络、DS 证据理论、TOPSIS 法

收稿日期: 2018-06-21

基金项目: 国家自然科学基金(61703412); 中国博士后科学基金(2016M602996)

作者简介: 高天祥(1993—), 男, 内蒙古包头人, 硕士生, 主要从事智能信息处理研究。E-mail: 18165213779@163.com

引用格式: 高天祥, 王刚, 岳韶华, 等. 基于贝叶斯决策理论的 NSHV 分段建模威胁评估[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(1): 60-66. GAO Tianxiang, WANG Gang, YUE Shaohua, et al. Segmental Modeling Threat Assessment of NSHV Based on Bayesian Decision Theory[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(1): 60-66.

等^[1-3],相关文献通常将其应用于战术、战略弹道导弹的威胁评估,对于临空高超声速飞行器(Near Space Hypersonic Vehicle,NSHV)鲜有涉及。NSHV 技术的飞速发展使得对其进行威胁评估成为现实需求,而 NSHV 的高动态特点要求评估方法具有较强的鲁棒性,本文结合 NSHV 的作战特点和现有威胁评估的相关准则和方法,提出一种基于贝叶斯决策理论的多飞行阶段 NSHV 威胁评估模型,将 NSHV 各阶段根据不同准则和评估因素采用贝叶斯模型进行建模,以适应 NSHV 的复杂运动特性和高动态特性。

1 临空高超声速飞行器作战过程概述

NSHV 作战轨迹不同于抛物弹道,呈现出多样化、复杂化的特点。图 1 为弹道导弹和常见 NSHV 飞行轨迹对比图,可以看出,NSHV 的运动轨迹虽然因型号不同而有所差异,但是基本可以归纳为 3 个飞行阶段:助推上升段、滑翔/巡航段以及俯冲下压段。助推上升段由火箭助推器将 NSHV 送至临近空间,该阶段加速度大,时间短,结束时速度在 $5Ma$ 左右;滑翔/巡航段 NSHV 基本位于临近空间飞行,时间长,速度在 $5 \sim 25Ma$,该阶段可通过超燃冲压发动机或者调整自身姿态实现跳跃式机动;俯冲下压段为飞行最末段,打击目标,此时某些 NSHV 可采用斜转弯技术实现横向机动,增强突防能力^[4]。

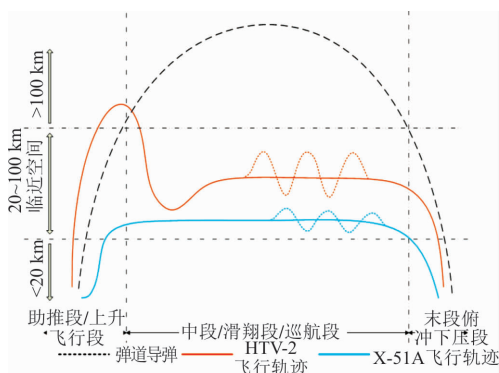


图 1 弹道导弹与典型 NSHV 飞行轨迹对比

2 分阶段贝叶斯威胁评估模型

2.1 贝叶斯网络理论

贝叶斯网络是以贝叶斯公式为基础的一种概率推理数学模型,常用于存在不确定因素的概率推理,具有强大的不确定性问题处理能力,其依据是贝叶斯公式及独立假设条件^[5]:

$$P(x | y) = \frac{P(xy)}{P(y)} = \frac{P(xy)}{\sum_x P(xy)} \quad (1)$$

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n P(x_i | p(x_i)) \quad (2)$$

该网络由若干节点和其之间网络结构组成。各节点 x_i 代表随机变量,节点之间的以条件概率来描述其相关程度^[5-6]。节点有父节点和子节点之分,没有父节点的节点用先验概率 $P(x_i)$ 进行表征。 $p(x_j)$ 为 x_j 的直接双亲节点。对具有 n 个隐藏节点、 m 个观测节点的 Bayes 网络,推理算法为:

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n | y_1, y_2, \dots, y_m) = \frac{\prod_j P(y_j | p(y_j)) \prod_i P(x_i | p(x_i))}{\sum_{x_1, x_2, \dots, x_n} \prod_j P(y_j | p(y_j)) \prod_i P(x_i | p(x_i))}, \quad j, i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

2.2 威胁等级评估框架

威胁等级 TL(Threat Level)是一个综合的概念,需要考虑敌方武器装备的攻击、突防能力 SC(Strike Capability)和我方防御武器的拦截防御能力 DC(Defense Capability)等客观因素,同时还包括基于侦察情报和传感器信息的对敌方攻击意图判断 IE(Intention Estimate)的主观因素^[7-10]。因此可细化为多个评估要素,该要素的选取直接影响到其所属因素的威胁程度^[11-12]。NSHV 各飞行阶段特点差异大,选取固定的评估要素不利于实现全面准确的评估。本文结合文献^[13~16]中的方法提出分阶段建模思想解决这一问题。分别对各阶段进行评估要素选取、建模,各阶段将上一阶段评估结果以先验概率的形式赋值于当前阶段的初始威胁值,保证了前后阶段评估上的传承连续性和评估要素选取的合理性。图 2 为威胁度贝叶斯评估模型框架。图中将威胁等级划分为 I 到 III 级,威胁等级随数字升高而降低。

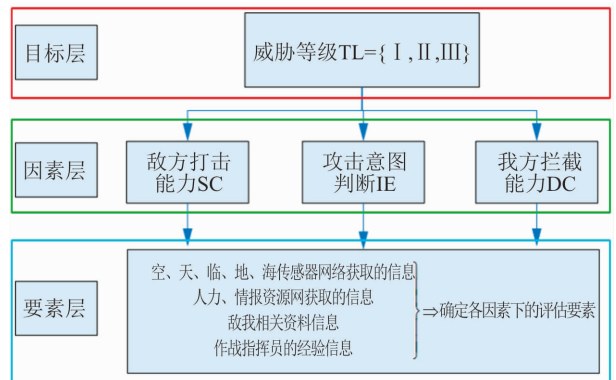


图 2 威胁评估贝叶斯模型框架

2.3 NSHV 分阶段建模

2.3.1 助推上升段 S_1

NSHV 助推上升段包括主动段和部分惯性段,是初始评估阶段。鉴于探测装备和拦截装备的局限

性,评估侧重于敌方打击能力和意图判断。

1)打击能力:该阶段主要通过红外预警卫星对目标进行探测,从其红外、电磁特性对来袭目标的种类、型号进行判断,另外还需考虑目标射程、上升结束时的高度等因素,这都是表征来袭目标打击能力的重要因素。

2)攻击意图判断:根据发射的射向和方位角对其轨迹进行初步的预测,同时结合相关情报、经验对其意图进行初步判断。

3)拦截能力:对于 NSHV 尚不具备拦截能力,故该阶段的评估要素主要倾向于传感器的空情态势感知能力和情报处理能力。

2.3.2 滑翔/巡航段 S_2

该阶段 NSHV 在一定高度的空域内做有动力巡航(X-51A)或无动力(跳跃)滑翔(HTV-2)运动。这一阶段占据 NSHV 飞行时间的最大比例,是威胁评估的重要阶段。

1)打击能力:进一步判断目标种类、型号、射程,同时需判断 NSHV 是否具备跳跃机动能力。

2)攻击意图判断:以航路捷径和航向、保卫要地重要程度、飞行高度为评估要素^[17]。事实上,航路捷径通常不使用重要程度描述,但作为评估要素需要对其进行量化处理,则将航路捷径越小的目标视为威胁越大即越重要的目标,故采用重要程度 $\{t_1, t_2, t_3\}$ 进行描述,在个案中以实际确定的量化准则为准。NSHV 落点具有不确定性,故保卫要地重要程度则需要以 NSHV 可能落点区域内保卫要地的最高重要程度作为该评估要素的结果。

3)拦截能力:主要涉及传感器网络跟踪及拦截武器自身能力,传感器网络主要需要解决稳定跟踪问题,武器拦截能力则通过拦截概率、拦截通道数量、抗干扰能力等进行表征。

2.3.3 俯冲下压段 S_3

该阶段是进行评估和拦截的最后阶段,具有时间上的紧迫性,故以拦截能力方面评估为侧重方面。

1)敌方攻击能力:主要关注飞行器所携带并释放的弹头,需考虑该弹头是常规还是非常规弹头,以及弹头的数量、精度和是否具有主动干扰能力。

2)攻击意图:依然将航路捷径和高度作为评估要素,需注意,NSHV 在高阶段通过倾斜转弯技术可实现横向大范围机动,对此也需要进行考量。

3)防御拦截:以防御武器拦截能力及抗干扰能力为主要评估因素。

三阶段贝叶斯模型,各因素、要素变量集合见表1,模型见图3。

表1 各因素及其元素集合

评估层级	评估因素/要素	因素/要素集合包含的元素
因素层	敌方打击能力 SC	{强,中,弱}
	攻击意图判断 IE	{ t_1, t_2, t_3 }
	我方防御能 DC	{强,中,弱}
要素层	目标类型 TT	{ O_1, O_2, O_3 }
	射程	{远,近}
	升空/飞行/再入高度	{高,中,低}
	射向	{朝向要地,背离要地}
	情报信息、经验信息	{ t_1, t_2, t_3 }
	航路捷径	{ t_1, t_2, t_3 }
	跳跃机动、横向机动能力	{强,弱}
	态势感知能力、情报处理能力、传感器信息处理能力、武器拦截能力	{强,弱}
	战斗部种类	{非常规 M_1 , 常规 M_2 }
	战斗部命中精度	{高,低}
	干扰、抗干扰能力	{强,弱}
	保卫要地重要程度	{非常重要,重要,一般}

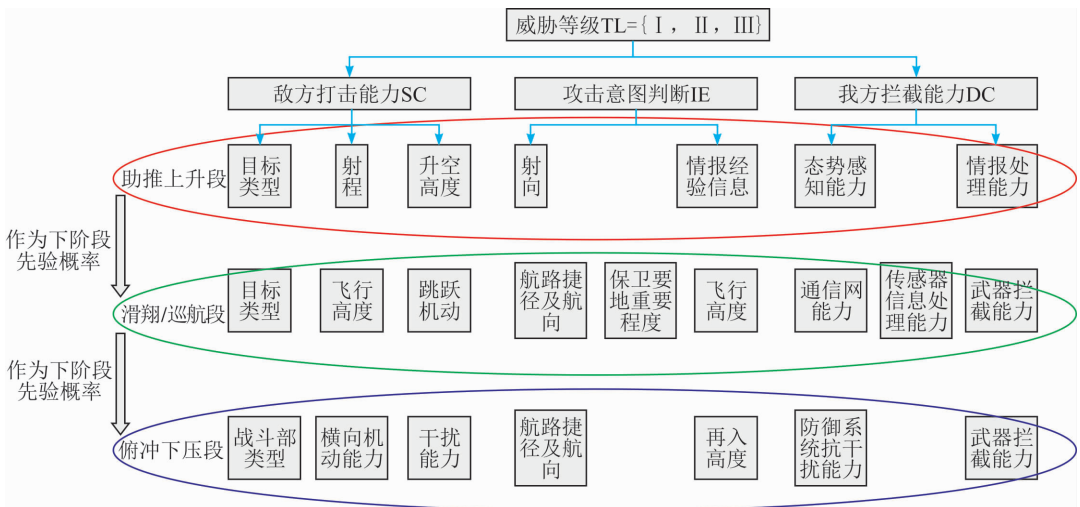


图3 三阶段贝叶斯模型

3 仿真分析

3.1 计算方法

根据前述内容可知该评估为动态贝叶斯评估,将式(3)进行扩展得到式(4):

$$P(x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}, \dots, x_{Tn} \mid y_{11}, y_{12}, \dots, y_{1m}, \dots, y_{T1}, \dots, y_{Tm}) = \frac{\prod_{k,j} P(y_{kj} \mid p(y_{kj})) \prod_{k,i} P(x_{ki} \mid p(x_{ki}))}{\sum_{x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}, x_{T1}, \dots, x_{Tn}} \prod_{k,j} P(y_{kj} \mid p(y_{kj})) \prod_{k,i} P(x_{ki} \mid p(x_{ki}))}, j = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, T \quad (4)$$

式中: k 为观测时间段,设共有 T 个观测时间段。式(4)描述了各观测值组合相同的情况,而本文评估过

程中,各阶段(时间段)观测组合不同,需对观测组合进行概率加权,得到式(5)为最终的计算公式:

$$P(x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}, \dots, x_{T1}, \dots, x_{Tn} \mid y_{11O}, y_{12O}, \dots, y_{1mO}, \dots, y_{T1O}, \dots, y_{TmO}) = \sum_{y_{11}, y_{12}, \dots, y_{1m}, \dots, y_{T1}, \dots, y_{Tm}} \frac{\prod_{k,j} P(y_{kj} = y_{kjO} \mid p(y_{kj})) \prod_{k,i} P(x_{ki} \mid p(x_{ki}))}{\sum_{x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}, x_{T1}, \dots, x_{Tn}} \prod_{k,j} P(y_{kj} \mid p(y_{kj})) \prod_{k,i} P(x_{ki} \mid p(x_{ki}))} \times \prod_{k,j} P(y_{kj} = y_{kjO}) \quad (5)$$

$j = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, T$

式中: $P(y_{kj} = y_{kjO})$ 表示在 k 时间段内,观测节点 j 处于 O 状态下的概率,本文指在某一个飞行阶段内不同评估要素的组合对应的概率。

形式以一维矩阵的形式给出概率,并输入子节点从而触发推理过程,最终仿真步骤为:

Step 1 确定贝叶斯网络关系,包括根节点先验概率及亲子代节点间条件概率(表 2~4);

Step 2 输入推理证据观测信息,即推动贝叶斯推理的即时输入信息,本文中为各评估要素的状态信息,以概率形式表征(表 5);

Step 3 求解根节点后验概率,得到推理后的新的威胁度概率;

Step 4 以上一阶段评估结果作为下一阶段先验概率,重复上述步骤实现各阶段的贝叶斯推理。

构建起贝叶斯网络模型后,明确网络最终的输出为根节点的后验概率。输入初始化信息和即时信息,初始化信息指根节点先验概率和网络结构条件概率,由于无任何已知信息,可对先验概率进行等概率赋值即 $P_{TL_0}(I, II, III) = (0.35, 0.35, 0.30)$,同时根据相关资料对各阶段、各层级转换的转移概率、条件概率进行赋值,见表 2~4。即时信息指在推理过程中获取的外部信息即证据观测信息,见表 5,各组观测数据按照表 1 的集合

表 2 目标层转移概率

P ($TL_{i+1} \mid TL_i$)	S_1 段			S_2 段			S_3 段		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
I	0.50	0.30	0.20	0.60	0.15	0.10	0.85	0.15	0.10
II	0.35	0.45	0.40	0.40	0.50	0.20	0.10	0.65	0.30
III	0.15	0.25	0.40	0.10	0.35	0.70	0.05	0.20	0.60

表 3 目标层、因素层间条件概率

威胁等级 TL	打击能力 SC			攻击意图 IE			防御能力 DC			
	强	中	弱	t_1	t_2	t_3	强	中	弱	
S_1	I	0.45	0.35	0.20	0.55	0.35	0.10	0.10	0.20	0.70
	II	0.40	0.45	0.15	0.30	0.60	0.10	0.20	0.60	0.20
	III	0.20	0.20	0.60	0.10	0.15	0.75	0.15	0.30	0.55
S_2	I	0.65	0.25	0.10	0.70	0.20	0.10	0.10	0.20	0.70
	II	0.30	0.45	0.25	0.15	0.65	0.20	0.20	0.45	0.35
	III	0.10	0.20	0.70	0.10	0.30	0.60	0.25	0.40	0.35
S_3	I	0.80	0.10	0.10	0.10	0.30	0.60	0.15	0.30	0.55
	II	0.30	0.60	0.10	0.15	0.65	0.20	0.25	0.60	0.15
	III	0.10	0.25	0.65	0.05	0.25	0.70	0.30	0.20	0.50

表4 因素层、要素层间条件概率

阶段	打击能力 SC	集合元素	强	一般	弱	意图判断 IE	集合元素	t_1	t_2	t_3	防御能力 DC	集合元素	强	一般	弱
S_1	目标类型	O_1	0.65	0.30	0.10	射程	远	0.75	0.60	0.50	态势感知	强	0.70	0.50	0.20
		O_2	0.25	0.50	0.25		近	0.25	0.40	0.50		弱	0.30	0.50	0.80
		O_3	0.10	0.20	0.65		t_1	0.70	0.20	0.15		强	0.80	0.60	0.20
	射向	朝向要地	0.70	0.50	0.40	情报经验	t_2	0.20	0.75	0.20	情报处理	强	0.80	0.60	0.20
		背离要地	0.30	0.50	0.60		信息	t_3	0.10	0.05		0.65	弱	0.20	0.40
	升空高度	高	0.60	0.50	0.15	航路捷径 及航向	高	0.60	0.20	0.15	通信组网	强	0.70	0.50	0.20
升空高度	中	0.25	0.30	0.30	t_2			0.20	0.65	0.30		弱	0.30	0.50	0.80
	低	0.15	0.20	0.55	t_3			0.10	0.20	0.65		强	0.80	0.40	0.30
S_2	目标类型	O_1	0.80	0.30	0.05	飞行高度	中	0.25	0.50	0.20	传感器网 信息处理	强	0.70	0.50	0.20
		O_2	0.15	0.50	0.20		低	0.15	0.30	0.65		弱	0.20	0.60	0.70
		O_3	0.05	0.20	0.75		非常 重要	0.80	0.20	0.05		强	0.80	0.50	0.30
	飞行高度	高	0.65	0.25	0.20	保卫要地 重要程度	重要	0.15	0.70	0.30	拦截武器	弱	0.20	0.50	0.70
中		0.20	0.60	0.20	一般		0.05	0.10	0.65	强		0.80	0.50	0.20	
跳跃机动	强	0.70	0.50	0.10	再入高度	低	0.30	0.50	0.60	抗干扰	强	0.80	0.50	0.20	
	弱	0.30	0.50	0.90		极低	0.70	0.50	0.40		弱	0.20	0.50	0.80	
S_3	战斗部	M_1	0.90	0.60	0.15	航路捷径 及航向	t_1	0.80	0.10	0.10	拦截武器	强	0.90	0.50	0.20
		M_2	0.10	0.40	0.85		t_2	0.15	0.80	0.20		弱	0.10	0.50	0.80
	横向机动	强	0.80	0.65	0.30		t_3	0.05	0.10	0.70		强	0.90	0.50	0.20
干扰能力	强	0.80	0.50	0.30	再入高度	低	0.30	0.50	0.60	抗干扰	强	0.80	0.50	0.20	
	弱	0.20	0.50	0.70		极低	0.70	0.50	0.40		弱	0.20	0.50	0.80	

表5 各阶段部分典型时刻观测证据

阶段	时刻	评估要素/观测证据							
		目标类型	射程	升空高度	射向	情报经验信息	态势感知能力	情报处理能力	拦截武器能力
S_1	1	(0.35,0.35,0.3)	(0.6,0.4)	(0.4,0.3,0.3)	(0.7,0.3)	(0.5,0.3,0.2)	(0.6,0.4)	(0.6,0.4)	
	10	(0.45,0.3,0.25)	(0.7,0.3)	(0.5,0.3,0.2)	(0.5,0.5)	(0.6,0.2,0.2)	(0.65,0.35)	(0.7,0.3)	
	20	(0.55,0.3,0.15)	(0.7,0.3)	(0.4,0.3,0.2)	(0.8,0.2)	(0.6,0.3,0.1)	(0.7,0.3)	(0.8,0.2)	
S_2	75	(0.45,0.3,0.25)	(0.8,0.2)	(0.2,0.8)	(0.6,0.3,0.1)	(0.5,0.2,0.3)	(0.6,0.3,0.1)	(0.5,0.5)	(0.5,0.5)
	125	(0.5,0.3,0.2)	(0.6,0.4)	(0.8,0.2)	(0.5,0.3,0.2)	(0.6,0.3,0.1)	(0.4,0.4,0.2)	(0.6,0.4)	(0.4,0.6)
	225	(0.55,0.3,0.15)	(0.7,0.3)	(0.5,0.5)	(0.6,0.3,0.1)	(0.7,0.2,0.1)	(0.5,0.3,0.2)	(0.6,0.4)	(0.6,0.4)
S_3	255	战斗部	横向机动	干扰能力	航路捷径	再入高度	抗干扰能力	拦截武器能力	
	265	(0.5,0.5)	(0.2,0.8)	(0.6,0.4)	(0.5,0.4,0.1)	(0.6,0.4)	(0.7,0.3)	(0.7,0.3)	
	275	(0.3,0.7)	(0.7,0.3)	(0.6,0.4)	(0.3,0.4,0.3)	(0.6,0.4)	(0.5,0.5)	(0.3,0.7)	

3.2 仿真结果与分析

假设一来袭目标为常规目标,射程较远,以高抛滑翔跳跃弹道飞行,飞向我方重要战略要地,并且具备一定的末端横向机动能力,我方防御能力则根据

武器装备能力合理设定。对各飞行阶段仿真作如下设置:助推上升段 S_1 为 0~25 s,巡航/滑翔段 26~250 s,俯冲下压段 251~280 s,总仿真飞行时长为 280 s。通过仿真得到各阶段威胁概率变化见图 4。

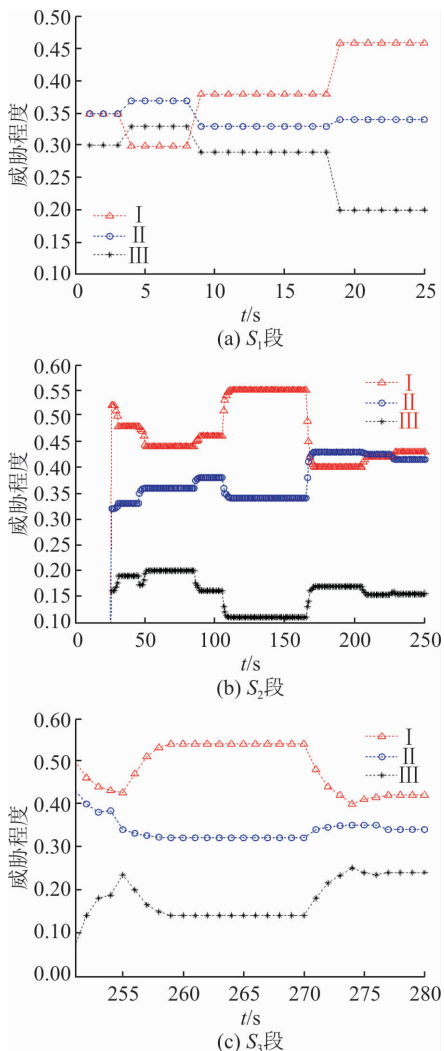


图 4 三阶段威胁度变化

图 4(a)为助推上升段(包含部分自由运动段)威胁程度的概率变化:0~3 s 内未获取足够的信息支持,评估结果仍为初始先验概率;3~8 s 根据传感器信息可初步判断其类型、发射朝向,但是由于 NSHV 发射之初很难确定其落点,由此带来的模糊性使得 I 级威胁度概率降低,II、III 级威胁概率上升;此后目标持续升空,参与探测跟踪的传感器数量增多、情报信息也更加丰富,但在该阶段尚不具备拦截能力,故 I 级威胁概率逐渐升高,随时间增长三者概率区分度提高。

图 4(b)为滑翔段威胁程度的概率变化。以助推段评估结果作为该阶段先验概率,60 s 内,由于该阶段在临近空间一定高度平稳飞行,在此过程中对该目标型号、航路捷径、攻击要地重要程度等因素的识别和预判使得威胁度有所降低,此后 20 s 左右根据计算结果的不同有所波动;80 s 时,该类目标进行其特有的跳跃机动,使得 I 级威胁概率陡然增加,从而使得其他威胁度概率减小,跳跃机动段历经时间较长,至 140 s 结束。此后,目标进入滑翔段末期,

此时已经具备相应的拦截能力,故 I 级威胁概率也因此而降低,II、III 级概率显著升高,此后由于飞行高度、拦截能力等因素的介入,使得 I、II 级威胁度在一定时间内交替变化,评估结果符合预设和 NSHV 实际特点。

图 4(c)为俯冲下压段威胁程度的概率变化。NSHV 进入俯冲段,此时防御方已经具备较成熟的拦截能力,故而 I、II 级威胁度概率逐渐降低,III 级威胁的概率升高。5 s 内 NSHV 通过转弯技术进行横向机动,使其突防能力增强,不确定度增加,I 级概率急剧增加,随后,由于防御方具备末段多层拦截能力,使 I 级威胁概率又降低至一个稳定的水平,3 个威胁概率趋于一个合理的平稳值,评估结果符合俯冲段目标特点和防御能力特点。

4 结语

空天防御作战正在向全程多段多层拦截发展,本文根据 NSHV 飞行特点,将其飞行阶段进行合理分段,并结合敌我双方能力对来袭目标在各段内进行实时评估,具备理论上和操作上的合理性。本文提出的基于贝叶斯网络的动态推理模型,根据作战特点多方面考虑评估要素,并在当前评估的同时考量有效历史信息,提高信息的利用率,使评估结果更加具有可靠性。

参考文献(References):

- [1] 全杰. 弹道导弹目标威胁评估模型和算法[J]. 现代防御技术, 2014, 42(4): 24-30.
QUAN J. Model and Algorithm in Threat Assessment of Ballistic Missile[J]. Modern Defence Technology, 2014, 42(4): 24-30. (in Chinese)
- [2] 徐浩, 邢清华, 黄兴. 不完全信息下的反 TBM 威胁评估[J]. 电光与控制, 2016, 23(11): 47-51.
XU H, XING Q H, HUANG X. Threat Assessment in Anti-TBM Combat with Incomplete Information[J]. Electronics Optics & Control, 2016, 23(11): 47-51. (in Chinese)
- [3] 范学渊, 邢清华, 黄沛, 等. 基于 TOPSIS 的战区高层反导威胁评估[J]. 现代防御技术, 2012, 40(4): 108-112. (in Chinese)
FAN X Y, XING Q H, HUANG P, et al. Threat Assessment of the High Altitude Area Ballistic Missile Defense Based on TOPSIS[J]. Modern Defence Technology, 2012, 40(4): 108-112. (in Chinese)
- [4] 王路, 邢清华, 毛艺帆. HTV-2 目标特性分析[J]. 飞航导弹, 2014(7): 22-24.
WANG L, XING Q H, MAO Y F. HTV-2 Target

- Characteristic Analysis[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2014(7):22-24. (in Chinese)
- [5] 卞泓斐, 杨根源. 基于动态贝叶斯网络的舰艇防空作战威胁评估研究[J]. 兵工自动化, 2015, 34(5):14-19. BIAN H F, YANG G Y. Threat Assessment on Ship Air Defense Based on Dynamic Bayesian Network. Ordnance Industry Automation, 2015, 34(5):14-19. (in Chinese)
- [6] HINSBERGEN C P, LINT J, ZUYLEN H J. Bayesian Committee of Neural Net-Works to Predict Travel Times with Confidence Intervals[J]. Transportation Research: Part C, 2009(17):498-509.
- [7] 周源, 燕军, 孙媛. 基于贝叶斯网络的要地防空目标威胁评估模型[J]. 海军航空工程学院学报, 2015, 30(5):467-472. ZHOU Y, YAN J, SUN Y. Target Threat Evaluation Model for Important Place Air Defense Based on Bayesian Network[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2015, 30(5):467-472. (in Chinese)
- [8] 姚跃亭, 赵建军, 万宇. 贝叶斯网络下考虑攻击企图的目标威胁评估[J]. 火力与指挥控制, 2017, 37(5):63-67. YAO Y T, ZHAO J J, WAN Y. Threat Assessment with Attack Attempt of Target Based on Bayesian Network[J]. Fire Control & Command Control, 2017, 37(5):63-67. (in Chinese)
- [9] 孟光磊, 龚光红. 基于混合贝叶斯网的空域目标威胁评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(11):2398-2401. MENG G L, GONG G H. Threat Assessment of Aerial Targets Based on Hybrid Bayesian Network[J]. Systems Engineering and Electronic, 2010, 32(11):2398-2401. (in Chinese)
- [10] 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 B, FANG L G, JIN Z. Research on Threat Assessment to Aerial Target Based on Bayesian Network[J]. Command Control & Simulation, 2011, 33(4):29-32. (in Chinese)
- [11] HAN M M. A Study of Threat Evaluation Using Learning-Bayesian Network on Air Defense[J]. Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, 2012, 22(6):715-721.
- [12] LIU J, LIAO X, YANG J B. A Group Decision Making approach Based on Evidential Reasoning for Multiple Criteria Sorting Problem with Uncertainty[J]. European Journal of Operational Research, 2015, 246(3):858-873.
- [13] NGAN S C. Evidential Reasoning Approach for Multiple-Criteria Decision Making: A Simulation-based Formulation[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(9):4381-4396.
- [14] KOLLER D, PFEFFER A. Object-Oriented Bayesian Networks[C]//Proc of the 13th Annual Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence, 2013:302-313.
- [15] 朱艺, 肖兵. 弹道导弹威胁估计模型构建[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(2):117-123. ZHU Y, XIAO B. Research on Model Building of Ballistic Missile Threat Assessment. [J]. Fire Control & Command Control, 2016, 41(2):117-123. (in Chinese)
- [16] CHAI H M, WANG B S. A Hierarchical Situation Assessment Model Based on Fuzzy Bayesian Network[J]. Lecture Notes in Computer Science, Artificial Intelligence and Computational Intelligence, 2011, 7003:444-454.
- [17] LIAO Q, QIU Z C, ZENG J P. Fuzzy Bayesian Networks and Its Application in Pressure Equipment's Security Alerts[C]//Seventh International Conference on Natural Computation, 2011:1507-1511.

(编辑: 徐敏)