

# IFS-BN 结合的辐射源威胁评估方法

张 莹, 王红卫, 郭晓陶, 范翔宇

(1. 空军工程大学航空航天工程学院, 西安, 7100381; 2. 西北工业大学电子信息学院, 西安, 710072)

**摘要** 针对辐射源威胁评估实时性、复杂性和信息不确定性的问题,将直觉模糊集与贝叶斯网络相结合,提出一种基于 IFS-BN 的辐射源威胁评估方法。IFS-BN 算法通过直觉模糊集刻画贝叶斯网络的节点信息,充分描述节点信息的确定性,不确定性以及犹豫度。同时,将直觉模糊集求得的各辐射源先验概率代入贝叶斯网络模型之中,得出后验概率进行威胁等级排序,并在此基础上建立了相应的评估指标体系。仿真分析表明,算法具有较好的可行性与有效性。与经典贝叶斯网络评估方法相比,IFS-BN 算法的结果更加客观合理。

**关键词** 辐射源威胁评估;直觉模糊集;贝叶斯网络;IFS-BN 算法

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.01.011

**中图分类号** TN97 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)01-0063-06

## An Assessment Method of Emitter Threat Based on Intuitionistic Fuzzy Sets and Bayesian Network

ZHANG Ying, WANG Hongwei, GUO Xiaotao, FAN Xiangyu

(1. Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Electronic Information College, North western Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Aimed at problems that there is a threat of emitter on timeliness, and complexity and imprecision exist in assessment process, a novel algorithm in assessment based on IFS-BN is proposed combined with Intuitionistic Fuzzy Sets (IFS) and Bayesian Network (BN). The IFS-BN algorithm fully describes determinacy, non-determinacy and hesitancy degree more adequately through the node information in Bayesian Network. On the basis of this, the algorithm substitutes priori probability calculated by Intuitionistic Fuzzy Sets into Bayesian Network model to obtain posteriori probability. Then, sequences of the threat level are acquired by posteriori probability. Meanwhile, corresponding evaluating index system of emitter threat assessment is established. The simulation shows that the algorithm is feasible and effective, and the results are much more objective and reasonable compared with the classical method of emitter threat assessment based on Bayesian Network.

**Key words:** emitter threat assessment; intuitionistic fuzzy sets; Bayesian network; IFS-BN algorithm

辐射源威胁评估是通过我方雷达和无源侦察设备观测到的辐射源参数(载频,重复频率,脉冲宽度,

**收稿日期:** 2016-06-08

**基金项目:** 航空科学基金(20152096019; 20145596025)

**作者简介:** 张莹(1993—),女,陕西西安人,硕士生,主要从事电子对抗理论与技术研究. E-mail: Zhangying19930505@163.com

**引用格式:** 张莹,王红卫,郭晓陶,等. IFS-BN 结合的辐射源威胁评估方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2017,18(1):63-68. ZHANG Ying, WANG Hongwei, GUO Xiaotao, et al. AEmitter Threat Assessment Method Based on Intuitionistic Fuzzy Sets and Bayesian Network [J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition),2017,18(1):63-68.

方位等)<sup>[1]</sup>来量化判断敌方的兵力结构部署,武器装备系统对我方构成威胁的能力,以及敌方可能的行动意图<sup>[2]</sup>。目前随着信息化、体系化作战的发展,战场态势愈加复杂多变。在这种情况下,如何全面掌握当前战场态势<sup>[3]</sup>,根据观测信号的特征参数和身份信息做出威胁判断,已经成为电子对抗领域的一个重要问题。与此同时,对敌方辐射源做到快速、准确的威胁评估,是准确判断敌情,进行干扰资源分配、制定有效干扰方案的前提和基础,也对战机完成作战任务与提高自身生存能力至关重要。

为了实现战场辐射源的威胁评估,文献[4]提出基于神经网络的威胁评估方法,通过监督学习的方式,完成对空战目标威胁评估;文献[5]使用基于模糊贝叶斯网络的威胁评估模型对模糊域和概率域数据进行融合处理,从而获得目标的威胁等级;文献[6]引入多专家广义参量集,构建了一种基于群广义直觉模糊软集的多属性威胁评估方法;文献[7]通过模糊认知图的方法构建模糊结构并建立复杂系统模型,进而实现对空中目标威胁等级的评估。这些方法可以对某一具体对象实现有效评估,但需要提供充足的先验信息来确立经验规则和推理网络,通用性较差。此外,现有方法对于信息的处理较为片面和绝对,没有把信息的模糊性引入推理过程,无法完成信息不确定性的衡量,因此在解决没有先验知识的多状态问题时具有一定的局限性。

在实际的战场侦察中,机载电子对抗设备可支配的电磁资源有限,且截获信息通常存在一定程度的数据缺失,难以提供充足的先验信息,因此现有的评估方法无法满足军事对抗对算法稳定性、实时性与准确性的严格需求。

## 1 IFS-BN 算法

贝叶斯网络<sup>[8-9]</sup>(Bayesian Network, BN)模型中的先验概率都是根据决策者的经验直接给出的,最终结果客观性,合理性较低;且贝叶斯网络中所用的概率为二值化的变量,只能表示“是”和“否”两种状态,不能刻画事物不确定或犹豫的一面。直觉模糊集(IFS)<sup>[10-11]</sup>与模糊集相比,增加了一个非隶属度函数,进而可以描述“非彼非此”的“模糊概念”<sup>[12]</sup>,可以同时表示支持,反对和中立3种状态,能够解决由于决策过程中先验知识的缺乏或者决策者的主观判断而导致的不确定的属性信息。本文结合两种算法各自的优点提出贝叶斯-直觉模糊(IFS-BN)算法,采用直觉模糊集描述贝叶斯网络中信息的确定性,不确定性以及犹豫度,并通过直觉模糊集

矩阵求得贝叶斯网络中的先验概率,克服了传统贝叶斯网络的缺陷,提高了算法的合理性。

IFS-BN 算法首先由军事专家根据先验信息和经验,确定贝叶斯网络中的节点内容和节点关系<sup>[13]</sup>,即子节点和父节点。子节点与父节点关系的强弱用条件概率表示,对没有父节点的子节点直接使用其先验概率。

这里引入直觉模糊集中隶属度和非隶属度的概念刻画节点信息。其中, $u_{ij}$ 为节点信息的隶属度函数,表示该节点发生的概率,一般通过已有的隶属度计算公式求出。 $v_{ij}$ 为节点信息的非隶属度函数,表示该节点不发生的概率, $v_{ij}$ 通过式(1)求出。

$$v_{ij} = 1 - u_{ij} - \pi_{ij} \quad (1)$$

式中: $\pi_{ij}$ 为节点信息的直觉指数,表示该节点的犹豫度,一般根据具体情况给出不同的计算公式。

根据求得的隶属度函数和非隶属函数创建直觉模糊矩阵  $\mathbf{M}_{m \times n}$ 。

$$\mathbf{M}_{m \times n} = \begin{bmatrix} (u_{11}, v_{11}) & (u_{12}, v_{12}) & \cdots & (u_{1n}, v_{1n}) \\ (u_{21}, v_{21}) & (u_{22}, v_{22}) & \cdots & (u_{2n}, v_{2n}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ (u_{m1}, v_{m1}) & (u_{m2}, v_{m2}) & \cdots & (u_{mn}, v_{mn}) \end{bmatrix}$$

通过式(2)得到评判矩阵  $\mathbf{R}_{m \times n}$ 。

$$\mathbf{R}_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

$$r_{ij} = u_{ij} + (1 - u_{ij} - v_{ij}) \frac{u_{ij}}{u_{ij} + v_{ij}} \quad (2)$$

式中: $r_{ij}$ 根据文献[14]中改进的精度函义定义。

同时,根据式(3)求多决策者对不同节点属性的总体偏好度。

$$d_i = \frac{1}{g} \sum_{q=1}^g \sigma_q \omega_{iq} \quad (3)$$

式中: $d_i$ ( $i=1, 2, \dots, n$ )为决策者对  $i$  个节点属性的总体偏好程度; $g$ 为决策者的人数; $\sigma_q$ ( $\sigma_q \in [0, 1], q=1, 2, \dots, g$ )为第  $q$  个决策者的权威值; $\omega_{iq}$ ( $\omega_{iq} \in [0, 1], i=1, 2, \dots, n$ )为第  $q$  个决策者对第  $i$  个节点属性根据经验给出的权重。根据  $d_i$  得到总体偏好度矩阵  $D = [d_1, d_2, \dots, d_n]$ 。

根据式(4)计算先验概率  $P'(A)$ 。

$$P'(A) = \mathbf{D}\mathbf{R}^T \quad (4)$$

对  $P'(A)$  归一化处理,即:

$$P(A) = \frac{P'(A)}{\sum_{i=1}^n P'(A)} \quad (5)$$

最后根据贝叶斯公式即(6)式求得子节点对父

节点的后验概率。

$$P(A|C) = \frac{P(A)P(C|A)}{P(C)} \quad (6)$$

式中: $P(A)$ 为先验概率; $P(A|C)$ 为后验概率; $P(C|A)$ 为条件概率,一般根据具体情况给出; $P(C)$ 根据全概率公式求出,即:

$$P(C) = \sum_{i=1}^n P(C|A = a_i)P(A = a_i) \quad (7)$$

式中: $A$ 为一个具有  $n$  个状态  $a_1, a_2, \dots, a_n$  的多状态变量。 $P(A|C)$ 为后验概率,IFS-BN 算法最终根据求出的子节点对父节点的后验概率  $P(A|C)$  进行决策分类和后续的应用。

## 2 IFS-BN 的辐射源威胁评估模型

### 2.1 辐射源威胁评估模型

本文结合现阶段雷达与无源侦察所能探测与侦收到的数据类型,构建影响雷达辐射源威胁程度的指标体系,主要分为:平台状态  $B_1$ , 雷达状态  $B_2$ 。并据此建立辐射源威胁评估指标体系见图 1。

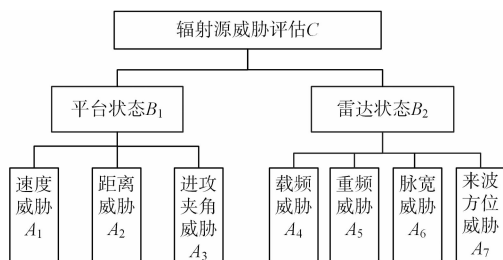


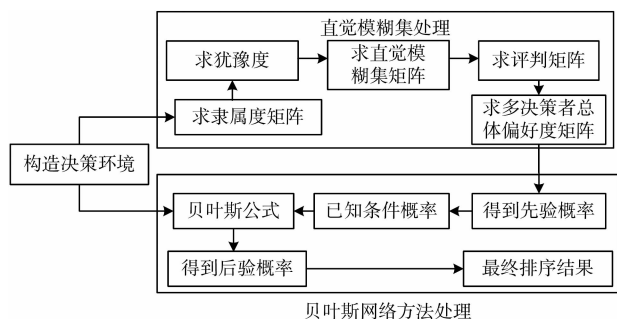
图 1 辐射源威胁评估指标体系

Fig. 1 The index system of emitter threat assessment

$B_1$  参量主要通过我方雷达参量的得到,  $B_2$  通过无源侦察设备截获敌方辐射源信号得到。

### 2.2 辐射源威胁评估算法

基本原理见图 2。



贝叶斯网络方法处理

图 2 基于 IFS-BN 的辐射源威胁评估模型

Fig. 2 The model of emitter threat assessment based on IFS-BN

具体评估步骤如下:

**Step1** 结合文献[6]和[15~16]根据隶属度公式建立当前时刻辐射源威胁隶属度矩阵  $U_{n \times 7}$ 。下面给出各属性的隶属度计算公式。

1) 平台速度威胁

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 1, x \geq v_2 \\ 0.7x + 0.3v_2 - v_1, v_1 < x < v_2 \\ 0.3, x \leq v_1 \end{cases} \quad (8)$$

敌方雷达平台速度直接关系到防空武器的系统反应时间和毁伤概率。速度越快,对我方威胁越大。 $v_1, v_2$ 为临界值,按照经验选取  $0.7Ma, 1.8Ma$ 。

2) 平台距离威胁

$$\mu_2(x) = \begin{cases} 0, x \geq r_2 \\ (\frac{x-r_2}{r_1-r_2})^2, r_1 < x < r_2 \\ 1, x \leq r_1 \end{cases} \quad (9)$$

敌方雷达平台距离反映敌方攻击企图和达成攻击可能性。其距离我方保护阵地的距离越小,威胁越大。 $r_1, r_2$ 为临界值  $r_1 = 5 \text{ km}, r_2 = 300 \text{ km}$ 。

3) 进攻夹角威胁

$$\mu_3(x) = \begin{cases} e^{-k(x-a)^2}, |x| \leq \pi/8 \\ 0.5, \pi/8 < |x| < \pi/2 \end{cases} \quad (10)$$

指挥员指定敌方主要来袭方向为基线,顺时针方向为正,规定敌方空袭目标与基线之间的夹角为目标进攻夹角。进攻夹角的绝对值越小,威胁程度越大。

其中  $k = 4.5, a = 0 \text{ rad}$ 。

4) 雷达载频威胁

$$\mu_4(x) = \begin{cases} 1, 8 \leq x \leq 40 \\ 0.7, 2 < x < 8 \\ 0.3, 0.8 \leq x \leq 2 \end{cases} \quad (11)$$

当前技术条件下,雷达大都工作于  $0.8 \sim 40 \text{ GHz}$  频段。雷达载频越高,对我方的威胁越大。

5) 雷达重频威胁

$$\mu_5(x) = \begin{cases} 0, 0 < x \leq 0.1 \\ 1 - e^{-(x-0.1)^2}, x > 0.1 \end{cases} \quad (12)$$

雷达辐射源重频越高,表明敌方雷达平台对我方实施攻击的可能性越高,威胁度也越高。

6) 雷达脉宽威胁

$$\mu_6(x) = \frac{1}{1+x^2} \quad (13)$$

敌方雷达脉宽越窄,其威胁程度就越高,当雷达脉宽接近于 0 时,威胁隶属度最大,接近于 1。

7) 雷达来波方位威胁

$$\mu_7(x) = \begin{cases} 1.0, \text{方位不变} \\ 0.8, \text{方位瞬变} \\ 0.5, \text{方位慢变} \end{cases} \quad (14)$$

方位不变表示敌辐射源已对我方目标跟踪或锁定,威胁最大;方位瞬变表示敌方雷达对我方目标搜索,威胁较大;方位慢变是舰载雷达对我方目标搜索,威胁较小。

### Step2 计算犹豫度

1)速度威胁、雷达来波方位威胁、雷达重频威胁、雷达载频威胁的取值越大其威胁程度越大。根据式(15)求犹豫度:

$$\pi = (0.5 + k)(1 - u_{ij}) \quad (15)$$

式中: $u_{ij}$ 为隶属度矩阵 $U_{n \times 7}$ 中第*i*个目标第*j*个属性的值; $k$ 为测量变化率,计算公式为:

$$k = \frac{r - r'}{r} \quad (16)$$

式中: $r'$ 为前一时刻 $t - \Delta t$ 的测量值, $r$ 为当前时刻 $t$ 的测量值。

2)平台距离威胁、雷达脉宽威胁、预攻击目标防御能力值越大威胁程度越小。据式(17)求犹豫度:

$$\pi = (0.5 - k)(1 - u_{ij}) \quad (17)$$

**Step3** 计算直觉模糊集矩阵 $M_{n \times 7}$ 。根据式(1)求得威胁评估非隶属度值 $v_{ij}$ ,由Step1求出的隶属度 $u_{ij}$ 和 $v_{ij}$ 得到直觉模糊矩阵 $M_{n \times 7}$ 。

**Step4** 计算总体偏好度。根据式(3)求多决策者对不同属性的总体偏好度,得到属性的总体偏好度矩阵 $D_{1 \times 7}$ 。

**Step5** 计算先验概率 $P(A)$ 。根据式(2)由直觉模糊矩阵 $M_{n \times 7}$ 得到评判矩阵 $R_{n \times 7}$ 。再根据式(4)求得先验概率 $P'(A)$ ,最后根据式(5)对 $P'(A)$ 归一化处理,求得 $P(A)$ 为最终的先验概率。

**Step6** 计算辐射源威胁评估结果。把根据式(7)求得的 $P(C)$ ,结合Step5求得先验概率和已知的条件概率代入式(6)求得后验概率,依据后验概率大小进行排序,得到最终辐射源威胁评估结果。

$$M = \begin{bmatrix} (0.332, 0.296) & (0.689, 0.162) & (0.998, 0.001) & (1, 0) & (1, 0) & (0.800, 0.112) & (1, 0) \\ (0.491, 0.385) & (0.419, 0.293) & (0.996, 0.002) & (1, 0) & (0.99, 0.01) & (0.307, 0.272) & (0.8, 0.2) \\ (0.300, 0.312) & (0.242, 0.359) & (0.500, 0.213) & (0.30, 0.38) & (1, 0) & (0.671, 0.096) & (1, 0) \\ (0.554, 0.231) & (0.309, 0.282) & (0.997, 0.002) & (0.70, 0.16) & (1, 0) & (0.038, 0.098) & (0.8, 0.2) \\ (1, 0) & (0.640, 0.139) & (0.999, 0.001) & (1, 0) & (1, 0) & (0.609, 0.231) & (0.5, 0.5) \end{bmatrix}$$

3)设有6位作战指挥员参与作战决策,其权威值为 $\sigma_q = (0.85, 0.79, 0.84, 0.92, 0.96, 0.87)$ ,他们对属性 $A_1 - A_7$ 根据个人作战经验设定初始权重 $\omega_1 - \omega_7$ 见表2。

根据Step2计算决策者对属性 $A_1 - A_7$ 的总体偏好度,整理可得最终的总体偏好度矩阵 $D = [0.127, 0.142, 0.145, 0.151, 0.136, 0.143, 0.156]$ 。

## 3 实例仿真及分析

本节仿真试验设定我方通过雷达和无源侦察设备探测到 $X_1 - X_5$ 共5个敌方雷达辐射源,分别得到前一时刻 $t - \Delta t$ 和当前时刻 $t$ 的时实指标参数见表1,其中 $A_1 - A_7$ 为7个评估指标。

表1 辐射源指标参数

Tab.1 The parameters of emitter

时刻	辐射源	速度 /Ma $A_1$	距离 /km $A_2$	进攻 夹角( $^\circ$ ) /GHz $A_3$	载频 /GHz $A_4$	重频 /kHz $A_5$	脉宽 / $\mu$ s $A_6$	来波 方位 $A_7$
$t - \Delta t$	$X_1$	0.77	56	-9	14	132	0.5	不变
	$X_2$	1.2	110	-17	11	2.7	1.7	瞬变
	$X_3$	0.54	156	25	2.0	12.5	0.9	不变
	$X_4$	1.41	140	12	3.6	4.2	7	瞬变
	$X_5$	1.7	66	8	13.2	135	0.7	慢变
$t$	$X_1$	0.75	55	-10	14	135	0.5	不变
	$X_2$	1.1	109	-15	11	2.5	1.5	瞬变
	$X_3$	0.55	155	27	1.9	14.5	0.7	不变
	$X_4$	1.0	136	14	3.5	4.7	5	瞬变
	$X_5$	1.8	64	9	13	137	0.8	慢变

具体步骤如下:

1)建立当前时刻辐射源威胁隶属度矩阵。将表2数据代入式(8)~(14),得到各辐射源隶属度值,从而当前时刻辐射源威胁隶属度矩阵 $U_{5 \times 7}$ 为:

$$U = \begin{bmatrix} 0.332 & 0.689 & 0.998 & 1.0 & 1.00 & 0.800 & 1.0 \\ 0.491 & 0.419 & 0.996 & 1.0 & 0.99 & 0.307 & 0.8 \\ 0.300 & 0.242 & 0.500 & 0.3 & 1.00 & 0.671 & 1.0 \\ 0.554 & 0.309 & 0.997 & 0.7 & 1.00 & 0.038 & 0.8 \\ 1.000 & 0.640 & 0.999 & 1.0 & 1.00 & 0.609 & 0.5 \end{bmatrix}$$

2)根据Step2求得各属性的犹豫程度,再根据Step3求出直觉模糊矩阵 $M_{5 \times 7}$ 。

表2 属性 $A_1 - A_7$ 的初始权重

Tab.2 The weight of attributes from  $A_1 - A_7$

属性	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$	$\omega_5$	$\omega_6$	$\omega_7$
$A_1$	0.142	0.135	0.155	0.160	0.135	0.146	0.127
$A_2$	0.132	0.145	0.152	0.156	0.141	0.140	0.134
$A_3$	0.145	0.129	0.159	0.142	0.139	0.131	0.155
$A_4$	0.161	0.154	0.148	0.136	0.141	0.135	0.125
$A_5$	0.143	0.148	0.154	0.151	0.133	0.140	0.131
$A_6$	0.139	0.145	0.152	0.146	0.147	0.132	0.139
$A_7$	0.146	0.141	0.154	0.158	0.137	0.134	0.130

4)根据 Step5 求得先验概率  $P(A) = (0.240, 0.196, 0.172, 0.181, 0.211)$ 。

连接树推理算法求得最终的后验概率  $P(A|C) = (0.251, 0.187, 0.172, 0.181, 0.209)$ 。条件概率根

5)根据 Step6 计算辐射源威胁评估结果。选择

据表 3 给出。

表 3 条件概率表

Tab. 3 The table of conditional probability

$P(B_1 C)$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$P(A_2 B_1)$	$B_{11}$	$B_{12}$	$B_{13}$	$B_{14}$	$B_{15}$	$P(B_2 C)$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$
$B_{11}$	0.1	0.2	0.3	0.2	0.3	$A_{21}$	0.2	0.3	0.2	0.1	0.1	$B_{21}$	0.2	0.3	0.1	0.2	0.4
$B_{12}$	0.3	0.1	0.1	0.3	0.1	$A_{22}$	0.1	0.1	0.1	0.3	0.2	$B_{22}$	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1
$B_{13}$	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	$A_{23}$	0.2	0.1	0.3	0.2	0.2	$B_{23}$	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2
$B_{14}$	0.1	0.4	0.1	0.1	0.2	$A_{24}$	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	$B_{24}$	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1
$B_{15}$	0.3	0.1	0.2	0.3	0.3	$A_{25}$	0.2	0.3	0.2	0.1	0.2	$B_{25}$	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2

$P(A_3 B_1)$	$B_{11}$	$B_{12}$	$B_{13}$	$B_{14}$	$B_{15}$	$P(A_1 B_1)$	$B_{11}$	$B_{12}$	$B_{13}$	$B_{14}$	$B_{15}$	$P(A_4 B_2)$	$B_{21}$	$B_{22}$	$B_{23}$	$B_{24}$	$B_{25}$
$A_{31}$	0.1	0.2	0.1	0.3	0.4	$A_{11}$	0.1	0.2	0.3	0.2	0.2	$A_{41}$	0.1	0.2	0.1	0.3	0.1
$A_{32}$	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	$A_{12}$	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	$A_{42}$	0.2	0.2	0.3	0.1	0.1
$A_{33}$	0.5	0.2	0.2	0.1	0.2	$A_{13}$	0.3	0.3	0.1	0.3	0.3	$A_{43}$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4
$A_{34}$	0.1	0.3	0.3	0.2	0.1	$A_{14}$	0.2	0.1	0.3	0.3	0.1	$A_{44}$	0.3	0.1	0.2	0.3	0.3
$A_{35}$	0.1	0.1	0.2	0.3	0.2	$A_{15}$	0.2	0.2	0.2	0.1	0.3	$A_{45}$	0.2	0.3	0.2	0.1	0.1

$P(A_5 B_2)$	$B_{21}$	$B_{22}$	$B_{23}$	$B_{24}$	$B_{25}$	$P(A_6 B_2)$	$B_{21}$	$B_{22}$	$B_{23}$	$B_{24}$	$B_{25}$	$P(A_7 B_2)$	$B_{21}$	$B_{22}$	$B_{23}$	$B_{24}$	$B_{25}$
$A_{51}$	0.2	0.2	0.3	0.1	0.2	$A_{61}$	0.2	0.2	0.2	0.3	0.1	$A_{71}$	0.2	0.3	0.4	0.2	0.2
$A_{52}$	0.1	0.3	0.1	0.2	0.1	$A_{62}$	0.1	0.3	0.1	0.1	0.2	$A_{72}$	0.3	0.1	0.1	0.3	0.3
$A_{53}$	0.2	0.1	0.2	0.3	0.4	$A_{63}$	0.2	0.1	0.3	0.2	0.2	$A_{73}$	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1
$A_{54}$	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2	$A_{64}$	0.3	0.2	0.1	0.3	0.3	$A_{74}$	0.2	0.3	0.1	0.2	0.2
$A_{55}$	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	$A_{65}$	0.2	0.2	0.3	0.1	0.2	$A_{75}$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

为验证本文基于 IFS-BN 的辐射源威胁评估方法结果的可靠性与有效性,下面我们计算基于贝叶斯网络的辐射源威胁评估结果,并根据两种方法的结果分析比较得到最终的结论。

根据基于贝叶斯网络的辐射源威胁评估方法,首先我们设定 5 个敌方雷达辐射源的先验概率  $P(A) = (0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2)$ ,已知的条件概率表同上,根据式(7)求得  $P(C)$ ,代入式(4)得到最终的后验概率  $P(A|C) = (0.215, 0.198, 0.187, 0.187, 0.213)$ 。

由基于 IFS-BN 的辐射源威胁评估求得的最终后验概率:  $P(A|C) = (0.251, 0.187, 0.172, 0.181, 0.209)$  可得 5 个敌方雷达辐射源威胁程度排序  $X_1 > X_5 > X_2 > X_4 > X_3$ 。根据表 1 和表 2 中的数据可以看出在探测到的 5 个雷达辐射源中  $X_1$  的距离最近,载频最高,脉宽最窄,来波方位不变,威胁程度最大。 $X_5$  的速度最快,进攻夹角最小,重频最高,但是  $X_5$  来波方位慢变,综合可得  $X_5$  威胁程度仅次于  $X_1$ 。其余几个雷达辐射源的威胁程度通过计算得到排序为,  $X_2 > X_4 > X_3$ 。基于贝叶斯网络的辐射源威胁评估得到的最终后验概率  $P(A|C) = (0.215, 0.198, 0.187, 0.187, 0.213)$ 。可得 5 个敌方雷达辐射源威胁程度排序为  $X_1 > X_5 > X_2 > X_4 = X_3$ 。

根据两种不同方法的排序结果可以看出,虽然基于贝叶斯网络的辐射源威胁评估与本文中基于 IFS-BN 的辐射源威胁评估得到的排序结果基本一致,但是将两种算法得到的后验概率取值对比可以看出,基于贝叶斯网络的辐射源威胁评估得到的最终后验概

率中  $X_1 = 0.215, X_5 = 0.213$  数值十分接近,勉强将其排序为  $X_1 > X_5$ 。并且最终后验概率中  $X_3 = X_4$ ,因此这 2 个敌方雷达辐射源威胁程度无法排序。

在实时性方面,由于本文算法主要是对辐射源个体特征层面进行处理,且只考虑平台状态和雷达状态共 7 个属性,相比于对信号层面的处理,本文算法需处理的数据量大大减少。此外,本文算法层面未涉及复杂的运算,多为简单的加乘运算,不需要大规模复杂的数据处理,只有对进攻夹角和雷达重频隶属度计算时涉及简单的指数运算。因此,在实际的复杂多变的战场环境中,数据量以及运行次数大大增加时,基于 IFS-BN 的辐射源威胁评估优势将体现出来。

总体而言,基于贝叶斯网络的辐射源威胁评估得到的敌方雷达辐射源威胁程度排序可信度较差,存在较大的误差。而本文基于 IFS-BN 的辐射源威胁评估,应用多决策者对不同属性的总体偏好度,并且通过直觉模糊集的方法求得各辐射源的先验概率,使贝叶斯网络模型中的后验概率更加合理,可信。因此本文基于 IFS-BN 算法得到的最终后验概率  $X_1 = 0.251, X_5 = 0.209$  数值相差较大,且其它 3 个后验概率也不尽相同,通过最终后验概率可将敌方雷达辐射源威胁程度合理排序,结果的可信度和合理性大于基于贝叶斯网络的辐射源威胁评估。

### 4 结语

本文在贝叶斯网络模型的基础上将直觉模糊集

理论和贝叶斯网络相结合,构建了基于 IFS-BN 的评估算法,并建立基于相应的辐射源威胁评估体系。文章应用决策者权威值与各属性权重相结合的方法,计算多决策者对不同属性的总体偏好度矩阵,从而有效的解决单个决策者引起的主观性和不确定性过大的问题。除此以外,本文结合直觉模糊集矩阵和总体偏好度矩阵求得各辐射源的先验概率代入贝叶斯网络模型,使最终求得的后验概率结果更加合理,可信。最后,通过实例仿真,对比分析证明基于 IFS-BN 的辐射源威胁评估相比基于贝叶斯网络的辐射源威胁评估可信度增强,结果更加客观合理。综上可得,本文基于 IFS-BN 的辐射源威胁评估为实际战场环境下的目标威胁评估提供了一种高效可行的评判方法。

### 参考文献(References):

- [1] 姜宁,胡维礼,孙翱. 辐射源威胁等级判定的模糊多属性方法[J]. 兵工学报, 2004, 25(1): 56-59.  
JIANG N, HU W L, SUN A. Fuzzy Multiattribute Method of Emitter Threatening Grade Evaluation[J]. Acta Armamentari, 2004, 25(1): 56-59. (in Chinese)
- [2] 王毅,刘三阳,张文,等. 属性权重不确定的直觉模糊多属性决策的威胁评估方法[J]. 电子学报, 2014, 42(12): 2509-2514.  
WANG Y, LIU S Y, ZHANG W, et al. Threat Assessment Method with Uncertain Attribute Weight Based on Intuitionistic Fuzzy multi-Attribute Decision[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(12): 2509-2514. (in Chinese)
- [3] 陈洁钰,姚佩阳,王勃,等. 基于结构熵和 IGSO-BP 算法的动态威胁评估[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(5): 1076-1083.  
CHEN J Y, YAO P Y, WANG B, et al. Dynamic Threat Assessment Based on Structure Entropy and IGSO-BP Algorithm [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(5): 1076-1083. (in Chinese)
- [4] 王改革,郭立红,段红,等. 基于萤火虫算法优化 BP 神经网络的目标威胁估计[J]. 吉林大学学报(工学版), 2013, 43(4): 1064-1069.  
WANG G G, GUO L H, DUAN H, et al. Target Threat Assessment Using Glowworm Swarm Optimization and BP Neural Network [J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2013, 43(4): 1064-1069. (in Chinese)
- [5] 康长青,郭立红,罗艳春,等. 基于模糊贝叶斯网络的态势威胁评估模型[J]. 光电工程, 2008, 35(5): 1-5.  
KANG C Q, GUO L H, LUO Y C, et al. Model of Situation and Threat Assessment Based on Fuzzy Bayesian Network [J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(5): 1-5. (in Chinese)
- [6] 武华,苏秀琴. 基于群广义直觉模糊软集的空袭目标威胁评估方法[J]. 控制与决策, 2015, 30(8): 1462-1468.  
WU H, SU X Q. Threat Assessment of Aerial Targets Based

- on Group Generalized Intuitionistic Fuzzy Soft Sets[J]. Control and Decision, 2015, 30(8): 1462-1468. (in Chinese)
- [7] CHEN J, YU G H, GAO X G. Cooperative Threat Assessment of Multi-aircrafts Based on Synthetic Fuzzy Cognitive Map[J]. Shanghai Jiaotong Univ (Sci), 2012, 17(2): 228-232.
- [8] 马德仲,周真,于晓洋,等. 基于模糊概率的多状态贝叶斯网络可靠性分析[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(12): 2607-2011.  
MA D Z, ZHOU Z YU X Y, et al. Reliability Analysis of Multi-State Bayesian Network Based on Fuzzy Probability [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(12): 2607-2011. (in Chinese)
- [9] CAI Z Q, SI S B, SUN S D, et al. Learning Bayesian Network Structure with Immune Algorithm[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2015, 26(2): 282-291.
- [10] XU Y J, WANG Y C, MIU X D. Multi-attribute Decision Making Method for Air Target Threat Evaluation Based on Intuitionistic Fuzzy Sets[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2012, 23(6): 891-897.
- [11] PARK J H, HWANG J H, PARK W J, et al. Similarity Measure on Intuitionistic Fuzzy Sets. [J]Journal of Central South University, 2013, 20: 2233-2238.
- [12] 雷英杰,王宝树,路艳丽. 基于自适应直觉模糊推理的威胁评估方法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(12): 2805-2809.  
LEI Y J, WANG B S, LU Y L. Techniques for Threat Assessment Based on Adaptive Intuitionistic Fuzzy Reasoning [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(12): 2805-2809. (in Chinese)
- [13] 王晓帆,王宝树. 基于贝叶斯网络和直觉模糊推理的态势估计方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(11): 2742-2746.  
WANG X F, WANG B S. Situation Assessment Method Based on Bayesian Network and Intuitionistic Fuzzy Reasoning[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(11): 2742-2746. (in Chinese)
- [14] 要瑞璞,沈惠璋. 区间直觉模糊集多属性决策方法[J]. 数学的实践与认识, 2011, 41(18): 135-138.  
YAO R P, SHEN H Z. Multicriteria Fuzzy Decision Making Method for Interval Valued Intuitionistic Fuzzy Set [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2011, 41(18): 135-138. (in Chinese)
- [15] 王红卫,范翔宇,索中英,等. 基于 RS-TOPSIS 的辐射源威胁排序方法[J]. 兵工学报, 2016, 37(5): 945-952.  
WANG H W, FAN X Y, SUO Z Y, et al. A Emitter Threat Evaluating Method Based on Rough Set and TOPSIS[J]. Acta Armamentari, 2016, 37(5): 945-952. (in Chinese)
- [16] 姚成才,苏同领. 基于模糊多属性群组决策的雷达辐射源威胁评估方法[J]. 舰船电子对抗, 2012, 35(4): 34-38.  
YAO C C, SU T L. Evaluation Method of Rader Emitter Threat Based on Fuzzy MAGDM[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2012, 35(4): 34-38. (in Chinese)

(编辑:姚树峰)