

doi: 10.7690/bgzdh.2024.03.016

基于贝叶斯网络的天基信息支援装备体系作战效能评估方法

于小岚, 熊 伟

(航天工程大学电子信息装备体系国防科技重点实验室, 北京 101400)

摘要: 针对天基信息支援装备体系效能评估存在的问题, 提出一种基于贝叶斯网络的天基信息支援装备体系作战效能评估方法。构建基于系统动力学的仿真平台获取仿真数据, 采用基于搜索的贝叶斯网络结构学习算法以及期望最大化(expectation maximization, EM)参数学习算法对数据样本进行学习构建贝叶斯网络模型, 以正向推理、因果追溯推理、阶段分析推理 3 种方式进行作战效能分析; 通过该模型深入分析海上方向远程精确打击移动舰船目标的作战场景下天基信息支援装备体系中诸多影响因素之间的相互关系与影响程度。仿真结果表明: 该方法应用在天基信息支援装备体系作战效能评估具备有效性和可行性, 能够为武器装备体系效能评估提供技术支持。

关键词: 贝叶斯网络; 推理分析; 作战效能评估; 天基信息支援装备体系

中图分类号: TJ01; TP79 **文献标志码:** A

Operational Effectiveness Evaluation of Space-based Information Support Equipment System Based on Bayesian Network

Yu Xiaolan, Xiong Wei

(Key Laboratory of National Defense Science and Technology of Electronic Information Equipment System, University of Aerospace Engineering, Beijing 101400, China)

Abstract: Aiming at the problems of effectiveness evaluation of space-based information support equipment system, a method of operational effectiveness evaluation of space-based information support equipment system based on Bayesian network is proposed. The simulation platform based on system dynamics is constructed to obtain simulation data, and the Bayesian network structure learning algorithm based on search and the expectation maximization parameter learning algorithm are used to learn the data samples to construct the Bayesian network model. Forward reasoning, cause-and-effect tracing reasoning, and stage analysis reasoning were used to analyze the operational effectiveness. The model was used to analyze the relationship and influence degree of many factors in the space-based information support equipment system in the combat scenario of long-range precision attack on moving ship targets in the direction of the sea. The simulation results show that the method is effective and feasible in the operational effectiveness evaluation of space-based information support equipment system, and can provide technical support for the effectiveness evaluation of weapon equipment system.

Keywords: Bayesian network; reasoning analysis; operational effectiveness evaluation; space-based information support equipment system

0 引言

天基信息支援装备体系作战效能评估是体系论证中的重要且关键的问题, 准确有效地评估其作战效能对于天基信息支援装备体系建设、部署、优化具有重要的理论与应用价值^[1]。

传统的评估方法多采用静态的评估方法, 首先建立指标体系, 然后运用层次分析法、模糊综合评估法、TOPSIS、ADC 等方法对系统进行评估, 近年来学者研究了多种动态的体系效能评估方法对天基信息支援装备体系进行评估。文献[2-4]将作战环应用于作战效能评估中, 通过引入信息熵、节点攻击策略等方法对作战效能有了更精确的评估。文献[5-7]通过结构方程模型对各型武器装备体系进行

作战效能评估, 针对非线性的刻画上进行了不同程度的优化。文献[8-10]将支持向量机引入作战效能评估领域, 并对参数进行优化设计, 实现对各类武器装备的快速作战效能评估, 但随着天基信息支援装备体系的复杂性不断提升, 体系评估工作面临着以下 2 个主要问题:

1) 指标之间相互影响的描述: 目前的作战效能评估方法对于作战效能揭示过程主要以指标聚合的方式进行线性刻画, 对指标与指标之间的相互影响以及指标与效能值之间相互影响的刻画上有所欠缺。尽管支持向量机、神经网络等方法能够在结果上描述其非线性变化, 但对作战过程中指标与效能值之间相互影响的刻画比较困难。

收稿日期: 2023-11-11; 修回日期: 2023-12-15

基金项目: 国防科技重点实验室基金(XM2020XT1023)

第一作者: 于小岚(1998—), 男, 四川人。

2) 作战效能的推理分析：目前的作战效能评估方法能够做到的效能分析，主要以作战方案出发由因果推断其作战效能值与作战的各项指标之间的关系，由于作战方案的设置形式单一、数据庞大以及不利于系统分析；因此，不能从多角度分析作战效能值与指标之间的影响，更加无法针对作战过程中的中间因素的影响进行推理分析。

贝叶斯网络^[11]是 Pearl 于 1986 年提出的一种基于不确定知识表达和推理方法。该理论能够借助数理统计知识解决复杂系统中的不确定性问题^[12]。天基信息支援装备体系在作战过程中的作战效能问题即是一个复杂系统的不确定性问题，贝叶斯网络对于天基信息支援装备体系的作战效能评估问题有着很好的适用性与发展前景。国内外对于贝叶斯网络应用于作战效能评估的关注度逐渐增多，文献 [13-16] 将贝叶斯网络应用于雷达电子战系统、陆空联合作战、装备维修保障等作战效能评估，由此可发现贝叶斯网络对于各型装备体系作战效能的评估描述与分析有较大优势。上述研究中，网络结构的确立一方面完全依靠专家经验，另一方面又完全依靠数据挖掘，2 种方式在结合实际情况过程中都会有不同程度的差异。

笔者结合天基信息支援装备体系的特点与现状，提出一种基于先验网络的贝叶斯网络的天基信息支援装备体系作战效能评估模型，对该型装备体系进行作战效能评估与分析推理，支持其发展建设与作战决策。

1 贝叶斯网络及适用性

1.1 贝叶斯网络基本原理

贝叶斯网络是一种用于描述变量间不确定性因果关系的图形网络模型，由节点、有向连线和节点概率表组成，其中有向连线代表节点之间的因果依赖关系^[17]。结合图 1 定义：贝叶斯网络是表示变量间概率依赖关系的有向无环图 $B = \langle N, A, \Theta \rangle$ ，这里每个节点 $n \in N$ 表示领域变量，每条边 $a \in A$ 表示变量间的概率依赖关系，同时每个节点都对应着一个条件概率分布表 (conditional probability table, CPT)，指明了该变量与父节点之间概率依赖的数量关系， Θ 表示 CPT 的参数^[17]。

一个贝叶斯网络有 N 个节点，特征变量为 X_1, \dots, X_n ，其中 X_i 代表贝叶斯网中对应的节点， $\pi(X_i)$ 代表义节点 X_i 的父节点集：

$$P(X_1, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | \pi(X_i))。$$

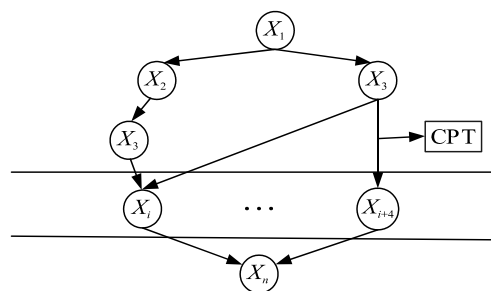


图 1 贝叶斯网络

由上图可以发现，贝叶斯网络与传统的作战环相同之处在于作战节点的定义方式，均是通过作战过程分析来抽取节点。不同点在于，贝叶斯网络注重的是节点之间的关联强度，而作战环关注的更倾向于两者之间的关联关系。

贝叶斯网络方法可以将整个作战过程描述为一个由节点、有向连线和节点概率表组成的有向无环图，将作战过程中的各项影响因素定义为随机变量对应的网络节点，有向边与节点概率表则可以表示两两之间的相互关系。

1.2 贝叶斯网络构建方法

贝叶斯网络建模包括结构学习、参数学习，目前主要采用专家经验法、数据驱动的结构学习与参数学习算法以及两者结合的方法。其一依赖主观经验，其结果的准确性无法得到保障；其二完全依据数据挖掘，虽然目前结构学习算法功能强大，但难免受限于数据样本缺失和陷入局部最优等问题，最终不符合主观经验的结果；其三两者结合的方法，该方法借助于专家经验构建先验网络，在先验网络的基础上建立仿真模型获取仿真数据，最终依靠数据样本实现准确的网络结构学习^[17]。

笔者将以贝叶斯先验网络为驱动构建效能仿真平台，构建基于贝叶斯网络的作战效能评估模型，如图 2 所示。

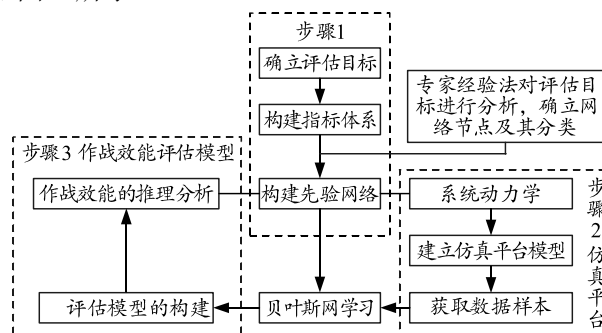


图 2 贝叶斯网络构建方法

贝叶斯网络的构建过程主要由以下 3 个步骤组成:

1) 构建先验贝叶斯网络: 由评估目标的指标体系出发结合专家检验对贝叶斯网络节点进行确定与分类, 在此基础上对节点之间的初步关系进行刻画, 为后续的贝叶斯网络学习打下良好基础。

2) 建立仿真平台: 贝叶斯网络的评估模型建立过程需要有数据样本学习, 因此笔者从评估目标的特点出发利用系统动力学的方法建立仿真平台^[18]; 通过设定作战方案获取丰富的样本数据, 其中样本数据包含了先验网络中的各个节点数据信息。

3) 构建作战效能评估模型: 通过丰富的样本数据, 在先验网络的约束下, 采用基于搜索的贝叶斯网络结构学习算法进行网络结构学习, 然后采用 EM 参数学习算法进行参数学习, 最终构建基于贝叶斯网络的作战效能评估模型。

2 基于贝叶斯网络的作战效能评估模型

2.1 作战效能评估模型

基于贝叶斯网络的天基信息支援装备体系作战效能评估模型本质上就是将天基信息支援装备体系作战过程中的每个影响因素抽象为网络节点, 其相互依赖关系则以边的形式刻画, 相互依赖的强度以概率分布的形式表现。作战效能评估模型的构建步骤如下:

1) 根据具体的作战任务, 理清天基信息支援装备体系在作战过程中各型武器装备的参战情况, 以及作战中作战效能会受到哪些因素的影响。

2) 贝叶斯网络节点与边的抽取: 结合作战过程的分析, 依靠专家经验分析, 对天基信息支援装备体系在特定作战任务中的节点进行分类确定, 将其抽象为作战想定节点、中间因素节点、扰动因素节点以及目标节点 4 类。其中: 作战想定节点是指天基信息支援装备体系的载荷参数、配置方案等; 中间因素节点是指受到作战想定节点、扰动因素节点影响, 并最终对目标节点产生影响的节; 扰动因素节点是指描述战场环境中的不确定节点; 目标节点是指描述最终评估问题的节点。在此基础上将其各个节点之间的相互影响抽象为连边。

3) 作战效能评估模型的构建: 通过仿真平台获取大量的样本数据, 在先验网络的约束下采用结构学习算法与参数学习算法对贝叶斯网络进行学习。

基于贝叶斯网络的天基信息支援装备体系作战效能评估模型的技术路线如图 3 所示。

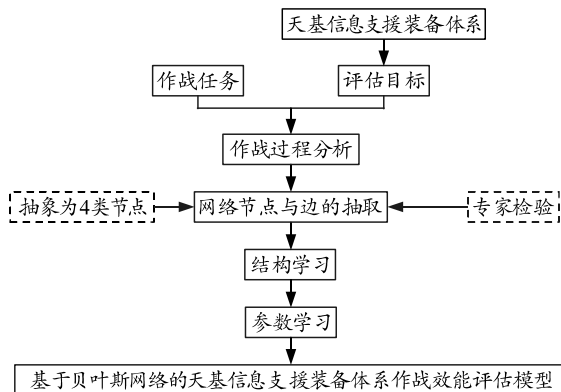


图 3 基于贝叶斯网络的天基信息支援装备体系作战效能评估技术路线

2.2 天基信息支援装备体系的指标体系构建

天基信息支援装备体系是一个典型的复杂系统, 而指标体系的合理构建是作战效能评估准确性的关键。

为确保最终评估模型的准确性, 针对天基信息支援装备体系的指标体系构建须遵循以下原则: 独立性、完备性、一致性以及客观原则性^[19]。其指标体系如图 4 所示。

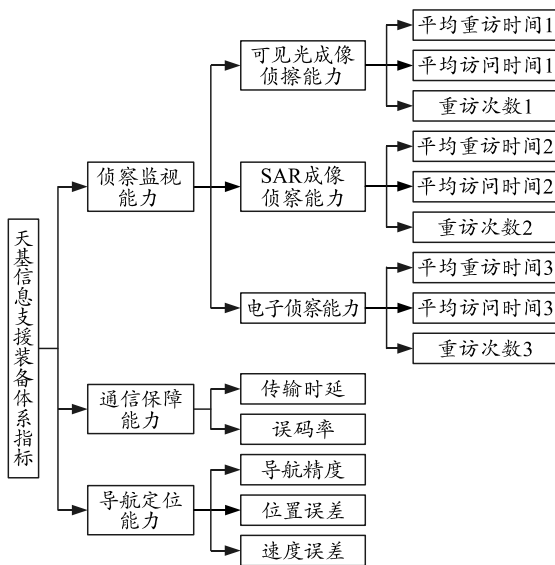


图 4 天基信息支援装备体系的指标体系

2.3 基于贝叶斯网络作战效能评估模型

笔者以面向海上方向支援远程精确打击移动舰船目标为作战任务, 建立天基信息支援装备体系的贝叶斯网络作战效能评估模型。

首先通过仿真平台获取从载荷到作战效能数据映射过程的指标数据, 然后在先验网络的约束下学习贝叶斯网络的网络结构与概率分布参数, 最后通过对贝叶斯网络模型进行推理分析实现对天基信息支援装备体系的作战效能分析。

2.3.1 背景设置与先验网络的确立

根据任务背景定义作战场景如下：对抗双方为红蓝双方，蓝方派出舰船前往红方某海域游弋，红方在天基信息支援装备体系的支持下，发现蓝方舰船目标并针对该目标实施远程精确打击，蓝方舰船实施电子干扰企图躲避攻击。其具体红蓝双方参与的武器装备如表 1 所示。

在背景设置基础上结合天基信息支援装备体系

的指标体系，将网络节点划分为作战想定节点、中间因素节点、扰动因素节点以及目标节点。网络节点分类如表 2 所示。

表 1 武器装备配置

红方	可见光成像侦察卫星、SAR 成像侦察卫星、电子侦察卫星、通信卫星、导航卫星、某型导弹
蓝方	某型舰船、雷达干扰机、导航干扰机

表 2 网络节点分类

作战想定节点	中间因素节点	目标节点	扰动因素节点
半视场角 T1 最大侧摆角 T2	平均访问时间 C1 平均重访时间 C2 重访次数 C3	区域覆盖率 C11 可见光成像侦察能力 R1 SAR 成像侦察能力 R2	电磁环境 D1
覆盖幅宽 E1	平均访问时间 C4 平均重访时间 C5 重访次数 C6	电子侦察能力 R3 通信保障能力 R4 导航定位能力 R5	天基信息支援装备体系的作战效能 W
最小俯仰角 S1 最大俯仰角 S2 前部排除角 S3 后部排除角 S4	平均访问时间 C7 平均重访时间 C8 重访次数 C9 传输时延 C10	侦察监视能力 F1	

在节点分类的基础上，由专家经验法构建先验网络如图 5 所示。

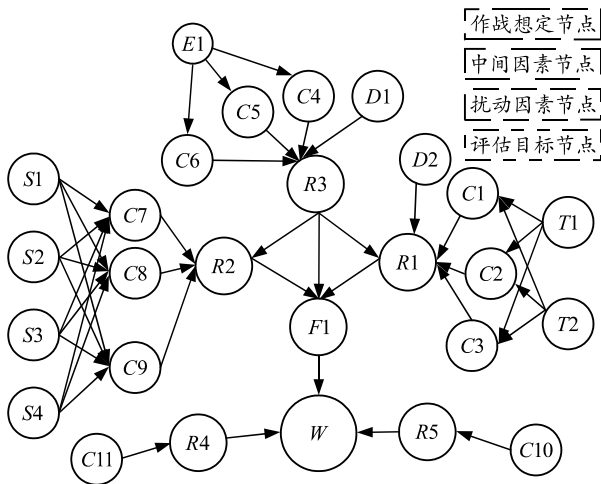


图 5 先验网络

2.3.2 贝叶斯网络学习算法

笔者在贝叶斯网络学习上采用的是基于搜索的贝叶斯网络结构学习算法^[20]与 EM 参数学习算法^[21]。

1) 基于搜索的贝叶斯网络结构学习算法。

① 确立评分函数，该函数用于评价网络结构的好坏。在给定的数据集 D 下，求取具有最大后验概率的网络结构 B_S，即求 P(B_S|D)=P(B_S, D)/P(D)的最大值，由于 P(D)与网络结构无关，故求取 P(B_S, D)的最大值即可；因此，笔者直接给出其评分函数的

公式^[20]：

$$P(B_S, D) = P(B_S) \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^{q_i} \frac{(r_i - 1)!}{(N_{ij} + r_i - 1)!} \prod_{k=1}^{r_i} N_{ijk}!$$

式中 P(B_S)为关于 B_S的先验概率，笔者假设每种结构的概率服从均匀分布，故而该值可定义为常数。

定义 Z 中包含了 n 个离散随机变量 X_i 的集合，每种变量 X_i 有 r_i 种可能的取值 (V_{i1}, V_{i2}, ..., V_{ir_i})。D 数据集中有 m 个样本，每个样本都有 Z 中随机变量的具体数值。B_S 则表示 Z 中随机变量所对应的网络结构，变量 X_i 的父节点表示为 π_i，而 W_{ij} 表示 π_i 的第 j 种具体数值，π_i 共有 q_i 种具体数值。N_{ijk} 表示数据 D 中 X_i 取值为 V_{ik} 且 π_i 被取值为 W_{ij}。值得注意的是：

$$N_{ij} = \sum_{k=1}^{r_i} N_{ijk}$$

由于 P(B_S)可以定义为常数，求取目标函数最大时，可以将目标函数约简为：

$$g(i, \pi_i) = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^{q_i} \frac{(r_i - 1)!}{(N_{ij} + r_i - 1)!} \prod_{k=1}^{r_i} N_{ijk}!$$

② 搜索策略，在确立评分函数以后，只需要求解出满足评分函数取最大的网络结构 B_S 即可。K2 算法所使用的搜索策略为贪心算法。首先假设随机变量是有顺序的，如果 X_i 在 X_j 之前，那么不能存在从 X_j 到 X_i 的边。同时假设每个变量最多的父变

量个数为 u 。每次挑选使评分函数最大的父变量放入集合，当无法使评分函数增大时，停止循环。

2) EM 参数学习算法。

EM 算法有 4 个步骤^[21]：

步骤 1：初始化一个 Θ^0 参数。

步骤 2：以当前参数 Θ^t 和一观测变量 X 推断应变量 Z 的分布 $P(Z|X, \Theta^t)$ ，并计算对数似然估计 $LL(\Theta^t | X, Z)$ 关于 Z 的期望。

$$Q(\Theta | \Theta^t) = E_{z|x, \Theta^t} [LL(\Theta | X, Z)]。$$

步骤 3：寻找参数最大化期望似然，即：

$$\Theta^{t+1} = \arg \max Q(\Theta | \Theta^t)。$$

步骤 4：重复步骤 1)—3)直至收敛。

2.3.3 贝叶斯网络推理模式

笔者采用的推理算法为联合树算法，联合树算法是通过贝叶斯网络转化为联合树的图形表达方式来表达联合概率分布，完成对贝叶斯网络的推理运算^[22]。

在该算法的基础上，贝叶斯网络的推理模式分为因果推理、诊断推理、解除消除^[23]3 类，结合文献^[23]与笔者的研究对象所考虑的影响因素，从正向推理、反向推理、阶段分析推理 3 方面对贝叶斯网络模型的节点进行推理分析。

1) 正向推理模式。

通过改变作战想定节点的取值，探索目标节点与中间因素节点的取值变化。通过假设作战方案为输入，借此分析目标节点的输出值。

2) 因果追溯分析模式。

该模式是一种由因到果的分析模式，充分利用了贝叶斯网络的反向推理能力，通过固定目标结点的取值，然后根据中间因素节点的变化，进而探索方案节点的取值。

3) 阶段分析推理模式。

该模式是一种从中间节点出发的分析模式，利用了贝叶斯网络正向逆向的双向推理模式。通过对中间节点进行改变，对作战过程中的中间因素的影响进行探索，能够对整个作战效能的提升做出全面的分析。

3 仿真实验验证

3.1 想定与数据预处理

根据 2.3.1 节的背景设置，设立作战想定，笔

者从参与作战任务的卫星有效载荷出发分析天基信息支援装备体系各型卫星系统的不同载荷参数对作战效果的影响。首先选定 5 颗可见光侦察卫星、4 颗 SAR 成像侦察卫星、4 颗电子侦察卫星，需要注意的是以上同类型的卫星采用的载荷参数均一致；然后将可见光侦察卫星、SAR 成像侦察卫星、电子侦察卫星的载荷参数按照不同类型采用不同的划分方式；随后进行随机搭配组合形成了 2 187 种不同的载荷参数组合类型的作战方案，如表 3-5 所示，总方案数：81*3*9=2 187。

表 3 雷达成像 (°)

方案	最小俯仰角	最大俯仰角	前部排除角	后部排除角
1	20	50	30	30
2	20	50	30	40
3	20	50	30	50
4	20	50	40	30
5	20	50	40	40
8	20	50	40	50
9	20	50	50	30
10	20	50	50	40
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
81	40	70	50	50

表 4 电子成像 km

方案	1	2	3
覆盖幅宽	2 000	3 000	4 000

表 5 可见光成像 (°)

方案	半视场角	最大侧摆角
1	20	20
2	20	30
⋮	⋮	⋮
9	40	40

通过 STK 于 Matlab 联合仿真获取天基信息支援装备体系的指标数据，然后依靠系统动力学所建立的仿真平台获取各项指标数据并进行归一化处理。考虑到贝叶斯网络的数据样本学习是针对离散化数据的，结合文献^[24]与卫星参数载荷的设置情况，笔者针对大部分指标数据采用等宽法进行离散化，离散化等级为 3 其中 $L1$ 、 $L2$ 、 $L3$ 分别表示低、中、高。其中较为特殊的是有些指标数据在离散化过程中发现其数据分布相对较为集中，为降低其信息特征的流失故采用离散化等级为 4—5 的方式针对其指标数据进行离散化。其中等级为 4 的有节点 $\{R1, R2, R3, R4, R5\}$ ，离散化等级为 5 的有节点 $\{C7, C8, C9\}$ 。最终验证发现采用以上离散化方法，使得各项指标数据分布均匀，能够有效的反映数据特征。离散化数据如表 6 所示。

表 6 离散化结果

方案	S1	S2	S3	S4	E1	T1	T2	C1	...	W
1	L1	L1	L1	L1	L1	L1	L1	L1	...	L1
2	L1	L1	L1	L1	L2	L1	L1	L1	...	L1
3	L1	L1	L1	L1	L3	L1	L1	L1	...	L1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2 187	L3	L3	L3	L3	L3	L3	L3	L2	...	L2

3.2 贝叶斯网络模型的学习

在先验网络的约束下，通过对大量的样本数据进行网络结构学习与参数学习，最后得到一个确定的贝叶斯网络结构与条件概率分布。采用 2.3.2 节

的学习算法，获得贝叶斯网络模型。

3.2.1 贝叶斯网络模型

通过贝叶斯网络学习算法，得到如图 6 所示的网络结构。

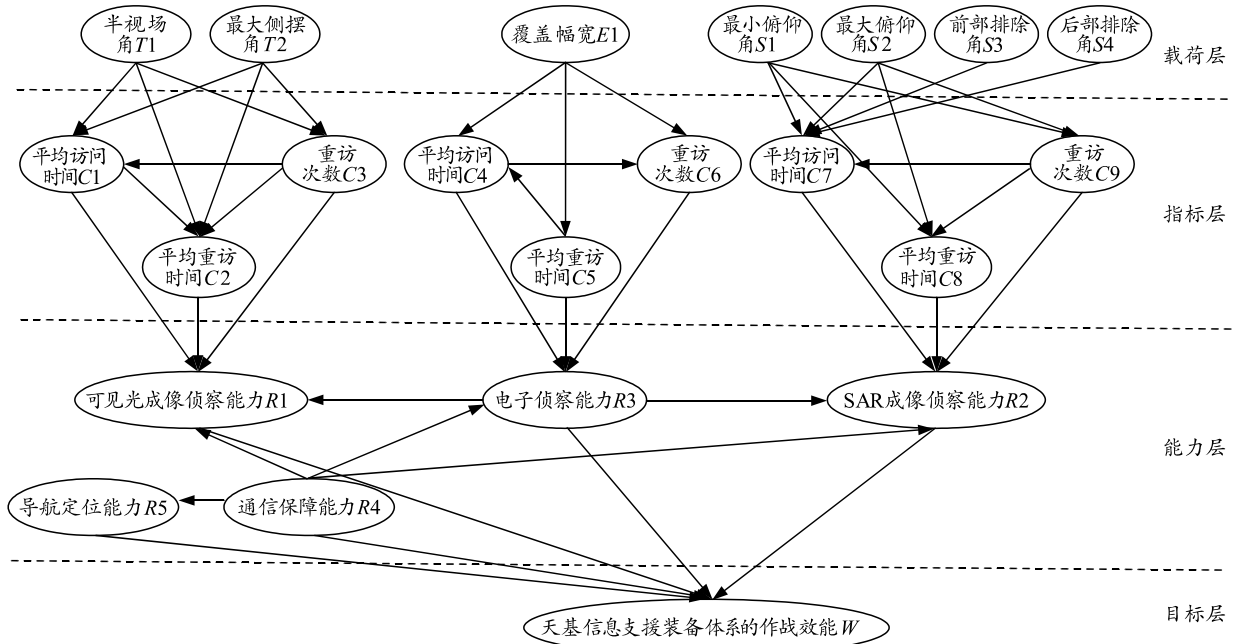


图 6 贝叶斯网络模型

在网络结构已知的情况下进行参数学习获条件概率表，因篇幅有限，故以指标层 C1 节点为例，如表 7 所示。

表 7 条件概率

半视场角 T1	最大侧摆角 T2	L1	L2	L3
L1	L1	0.997 0	0.001 3	0.001 3
	L2	0.997 0	0.001 3	0.001 3
	L3	0.997 0	0.001 3	0.001 3
L2	L1	0.997 0	0.001 0	0.001 3
	L2	0.997 0	0.001 3	0.001 3
	L3	0.001 3	0.997 0	0.001 3
L3	L1	0.997 0	0.001 3	0.001 3
	L2	0.001 3	0.997 0	0.001 3
	L3	0.001 3	0.001 3	0.997 0

3.2.2 合理性分析

针对单个节点进行验证分析，以目标层节点一天基信息支援装备体系的作战效能为分析节点。通过对比仿真平台获取的作战效能值与贝叶斯网络模型获取的作战效能值，以矩阵的方式对作战效能的

预测值与真实值的准确性进行表示，其中，真实值指的是不同的作战方案在仿真平台获取的作战效能的数值进行离散化以后的结果，而预测值指的是不同的作战方案在贝叶斯网络模型中计算获得的作战效能的离散化数值。如表 8 所示，作战方案总数为 2 187，加粗的表示目标节点的取值一致的作战方案数量。

表 8 对比矩阵

节点取值	预测值			总数
	L1	L2	L3	
L1	557	56	0	613
L2	5	932	5	942
L3	0	11	621	632

从上表可知，目标节点的正确率较高，结合矩阵所代表的含义可计算出目标节点所取离散等级 L1 至 L3 概率分布的正确率分别为 0.9、0.98、0.98；因此，所建立的贝叶斯网络模型合理可靠。

3.3 贝叶斯网络的推理分析

利用贝叶斯网络推理分析对天基信息支援装备体系进行作战效能分析,在此基础上寻找对作战效能值影响最大的节点,结合天基信息支援装备体系的各项参数,最终对天基信息支援装备体系的建设发展提出合理性意见。

3.3.1 正向推理

笔者设定作战想定方案时仅考虑作战想定节点与目标节点之间的影响,故独立的中间节点 {R4, R5} 在 L4 上的概率分布设置为 100%,记录目标节点取值为 L3 时的概率分布,具体结果如表 9 所示。

表 9 正向推理结果 %

节点	等级	W	最佳参数
S1	L1	63	L1
	L2	57	
	L3	49	
S2	L1	55	L3
	L2	56	
	L3	57	
T1	L1	48	L3
	L2	60	
	L3	61	
T2	L1	48	L3
	L2	48	
	L3	74	
E1	L1	57	L3
	L2	59	
	L3	62	

根据推理结果可得,将最佳参数设置代入贝叶斯网络模型中,得到天基信息支援装备体系的作战效能值取 L3 的概率分布为 95%。同时观察该节点取 L2 与 L1 的概率分别为 2%与 3%。因此,可以确认在通信保障能力与导航能力一定时,侦察监视系统各个载荷的配置可以参考推理结果进行配置。

3.3.2 因果溯源分析推理

结合本文中的作战任务背景设置,笔者主要关注侦察监视系统的 3 种侦察卫星系统在天基信息支援装备体系作战效能中的影响,故在进行因果溯源分析推理时,设定推理证据为:

1) 以目标节点一天基信息支援装备体系的作战效能值为变化值,将 L1、L2、L3 的概率分布依次设定为 100%。

2) 设定通信保障能力节点与导航定位能力节点在 L1~L4 的概率分布为平均分布。

结果如表 10 所示。

1) 可见光侦察能力与 SAR 成像侦察能力对于目标节点的敏感性是比较高的,说明在该任务背景下,提升可见光侦察能力于 SAR 成像侦察能力,对

最终作战效果的提升有着较为明显的作用。将两者在目标节点取 L3 的概率分布为 100%时两者取 L4 时的概率分布进行对比发现,对可见光侦察能力的需求相对更高;因此,在执行该作战任务时应当优先保障可见光侦察能力。

表 10 因果溯源分析推理结果 %

节点	W	L1	L2	L3
R1	L1	35	16	12
	L2	29	36	22
	L3	22	36	32
	L4	14	12	34
R2	L1	28	19	15
	L2	28	29	27
	L3	26	34	30
	L4	18	19	28
R3	L1	22	22	12
	L2	22	17	22
	L3	25	26	31
	L4	31	34	34

2) 电子侦察能力相对来说变化不够明显,其概率分布相对比较平均。单纯依靠因果溯源推理对该能力的分析还不够全面,下一节将针对其进行阶段性分析,进一步深入探究电子侦察能力在作战过程中担任着什么样的作用。

3.3.3 阶段分析推理

在因果追溯分析推理的基础上,将从中间节点一电子侦察能力出发,设置推理证据如下:

1) 以中间节点一电子侦察能力为变化值,从将 L1、L2、L3 的概率分布依次设定为 100%。

2) 可见光侦察卫星与 SAR 成像侦察卫星的载荷参数设置,按照 3.3.1 节的最佳参数设置。

3) 设定通信保障能力节点与导航定位能力节点在 L4 的概率分布为 100%。

结果如表 11 所示。

表 11 阶段分析推理结果 %

R3	R1				R2				W		
	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3
L1	25	25	25	25	25	25	25	25	33	33	33
L2	10	10	48	32	3	34	33	30	23	23	54
L3	20	20	20	41	11	27	37	25	20	25	55
L4	9	9	52	31	3	36	33	29	19	19	62

由上表可得出以下结论:

随着电子侦察能力节点的概率分布设定从 L2~L3 变化时,可见光侦察能力节点、SAR 成像能力节点以及天基信息支援装备体系的作战效能节点均有明显增高,故说明电子侦察能力对以上 3 个节点都有一定提升作用。但随着电子侦察能力提升至 L4 时,对于可见光侦察能力节点与 SAR 成像侦

察能力节点的变化出现了下降的趋势，然而作战效能节点稳步增长。

结合仿真平台的作战设定进行分析可发现：在作战任务执行时，电子侦察率先进行侦察，而可见光侦察与 SAR 成像侦察是进行协同侦察，故当电子侦察能力升高到一定程度时，对于 2 种成像侦察的需求会呈现一定的下降趋势。故在作战过程中对电子侦察能力的需求应当结合 2 种成像侦察能力的实际情况做出调整。

该结论不仅反映了指标之间相互影响的刻画，同时反向验证了贝叶斯网络模型的正确性。

4 结论

天基信息支援装备体系是一个典型的复杂武器装备体系，遂行作战任务时包含着诸多的不确定性因素；因此，对其进行作战效能评估是一个复杂的系统问题，此外还需考虑诸多影响因素的相互约束。基于以上原因，笔者引入贝叶斯网络方法对天基信息支援装备体系支援海上方向远程精确打击移动舰船目标进行作战效能评估，并建立评估模型，对天基信息支援装备体系进行推理分析。该方法能有效地反映作战过程中诸多影响因素的相互关系，合理地提出对天基信息支援装备体系的建设发展提出建议指导。本文中的主要工作及结论如下：

1) 研究基于贝叶斯网络的作战效能评估模型的构建方法。借助该方法，以天基信息支援装备体系在海上方向支援远程精确打击移动舰船目标为应用背景，验证贝叶斯网络在处理复杂系统评估问题上的合理性与可靠性。

2) 对贝叶斯网络的推理方法进行研究，结合天基信息支援装备体系在作战过程中的应用实际，采用正向推理、因果追溯推理、阶段分析推理 3 种推理分析模式对天基信息支援装备体系的各个影响因素进行分析验证，在此基础上验证该方法对指标之间相互关系的刻画能力，并提出在未来发展中切实可行的建议意见。

参考文献：

[1] 李德仁, 沈欣. 我国天基信息实时智能服务系统发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(2): 138-143.
 [2] 罗承昆, 陈云翔, 王莉莉, 等. 基于作战环和改进信息熵的体系效能评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(1): 73-80.
 [3] 梁家林, 熊伟. 基于作战环的武器装备体系能力评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(8): 1810-1819.

[4] 杨圩生, 王钰, 杨洋, 等. 基于作战环的不同节点攻击策略下的作战网络效能评估[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(11): 3220-3228.
 [5] 张少卿. 基于非线性 SEM 的航空反潜装备作战能力评估方法[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
 [6] 刘学星. 基于结构方程模型的装备体系评估方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
 [7] 韩驰, 熊伟, 刘文文, 等. 基于结构方程模型的天基信息系统效能评估[J/OL]. 系统仿真学报, 2022: 1-12. [2022-04-12]. DIO:10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0361.
 [8] 马兴民, 张勇. 基于混沌粒子群支持向量机的电子战无人机作战效能评估[J]. 软件工程, 2020, 23(12): 1-3.
 [9] 胡笛, 李浩悦, 李健. 基于改进支持向量回归机的天基信息系统效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(7): 78-82.
 [10] 韩驰, 熊伟. 基于改进灰狼算法优化 SVR 的航天侦察装备效能评估[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(10): 2902-2910.
 [11] PEARL J. Fusion, Propagation, and structuring in belief networks[J]. Artificial intelligence, 1986, 29(3): 241-288.
 [12] 李明. 贝叶斯网络结构与参数优化学习及其海洋环境风险评估应用研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
 [13] ZHENG Y J. Research on Combat Effectiveness Evaluation of Radar EW System Based on Bayesian Network[J]. Advanced Materials Research, 2011, 1158(204-210): 1697-1700.
 [14] 周兴旺, 从福仲, 庞世春. 基于 BN-and-BP 神经网络融合的陆空联合作战效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(4): 3-8.
 [15] GU Y H, CHENG Z H. Effectiveness Evaluation of Wartime Equipment Maintenance Support Based on Bayesian Network[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 569(5): 052017.
 [16] 张海峰, 于忠琳, 谢宇鹏. 基于贝叶斯一嫡权法的岸舰导弹作战效能研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2020, 35(4): 310-315.
 [17] 刘明辉. 贝叶斯网络驱动的效能仿真与评估模型建构方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
 [18] JIA N P, YANG Z W, YANG K W. Operational Effectiveness Evaluation of the Swarming UAVs Combat System Based on a System Dynamics Model[J]. IEEE Access, 2019, 7: 25209-25224.
 [19] 韩驰, 熊伟. 航天侦察装备体系指标关联信息挖掘研究[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(10): 2372-2380.
 [20] COOPER G F, HERSKOVITS E. A Bayesian method for the induction of probabilistic networks from data[J]. Machine Learning, 1992, 9(4): 309-347.