

可实现的 DSA 态势感知和决策的因果推理*

吴东民¹, 胡代弟²

(1. 重庆师范大学 教务处, 重庆 401331; 2. 郑州大学 西亚斯国际学院, 河南 新乡 451150)

摘要:【目的】针对系统能否准确确定原位策略一致性的运行状态这一问题,当前研究主要基于先验模型的全局运行约束以降低系统性能为代价来达到低的风险性。为弥补其中缺陷,提出一种可实现动态频谱接入(DSA)态势感知和决策的随机推理方法。【方法】在 DSA 系统的环境感知和决策制定中应用概率结构因果模型以及多属性决策理论来获得概念界定、灵活性和潜在功效上的优势,并利用一阶逻辑和 DSA 内在的不确定性对感知和决策进行管理。【结果】构建了推理结构的数学表达,并实现一种基于多实体贝叶斯网络(MEBN)的 DSA-SCM 概率建模方法。【结论】提出的原位概率随机推理方法性能更高,灵活性更强。

关键词:动态频谱接入;概率因果推理;多属性决策;态势感知

中图分类号:TP393

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2017)01-0078-07

动态频谱接入(Dynamic spectrum access, DSA)网络通过动态调整频率、功率、带宽等网络接入参数,使得网络的运行更适应于多变的无线电磁环境^[1],同时也保证网络的接入用户有序使用临时频点,不会产生相互干扰。所以在频谱资源的利用效能上,DSA 较静态频谱指配(Static spectrum assignments)方式更具优势^[2]。DSA 使用“人在回路”(Man in loop)过程模式,在相互约束条件下授予用户临时频点使用权限。而这些约束条件是在广泛建模分析所得常规策略的基础上构建的,具有很强的针对性和指导意义。近年来,大量应用表明基于 DSA 的频谱接入管理模型在频谱资源需求日趋紧张的态势下,体现良好的应用前景^[3-4]。

1 研究背景

DSA 的基本原理是根据现场电磁环境细化制定无线电频谱的接入许可条件和行为约束条件,从而促进无线设备发挥最好的功效。为实现这一目标需要解决两个基本问题:一是关于频谱接入许可条件和行为约束条件的有效鉴定;二是对系统内行为是否符合条件的可靠性研判。基于策略推理机的条件鉴定方法^[5-7]作为第一个问题的解决方案得到了学术界的广泛认可,而对于第二问题,目前还缺乏相应的成果。

不确定性是实现对其行为可靠性研判的最大障碍。不确定性主要包括无法对环境进行有效感知,无线通信与生俱来的不稳定性,以及对未来环境状态的不可知等。当前研究主要关注 DSA 系统用户间产生相互干扰的风险,包括存留时间、当前位置、同步通信损耗等,这有可能与其他用户产生冲突。比如对于无线对讲机、电视信号接收器等低功率或被动(只有接收功能)设备,由于难以被检测到,受到干扰的风险较高。DSA 系统的一般框架可用图 1 来表示^[5]。虽然通过策略控制可推断出频谱访问规则所明确的约束和授权,但是策略控制需要一种相兼容的定量计算方法才能开发出各种策略。对于这种因感知困难而产生用频干扰的问题,目前主要是在 DSA 系统中应用传统无线系统控制技术。但这种方法具有 3 方面显著缺陷:

1) 严重影响系统功效。虽然系统内用户冲突的情况会造成不良后果,但该情况发生概率较低。而针对这种低概率事件采用广泛的行为约束条件,将严重降低系统功效。

2) DSA 的基本理念未得到体现。DSA 的基本理念是根据具体环境条件制定有针对性的约束条件,引导系统用户行为。线下工程分析应用于对电磁环境和用户行为的特征掌握,而不是导致硬性规定的出台,约束所有

* 收稿日期:2016-05-24 修回日期:2016-07-14 网络出版时间:2017-01-12 11:34

资助项目:重庆市高等教育教学改革研究项目(No. 1530660)

第一作者简介:吴东民,男,实验师,研究方向为计算机网络, E-mail:247103210@qq.com;通信作者:胡代弟,讲师, E-mail:7316055@qq.com

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.n.20170112.1134.028.html>

用户行为。

3) 该方法应用扩展性较低。每个系统的风险问题取决于其系统类别、详细设计等其他因素,仅通过线下工程分析试图定位所有风险存在的角落是不切实际的。

为了解决这些缺陷,较合理的方法是通过现有电磁环境观测数据的量化计算,分析得出 DSA 系统风险特征(如引起干扰的概率等),从而促使系统运行能够适应于这种风险环境。本研究在 DSA 系统的环境感知和决策制定中应用概率结构因果模型(Structural causal models, SCMs)^[8]以及多属性决策理论^[9]来获得概念界定、灵活性和潜在应用功效上的优势。

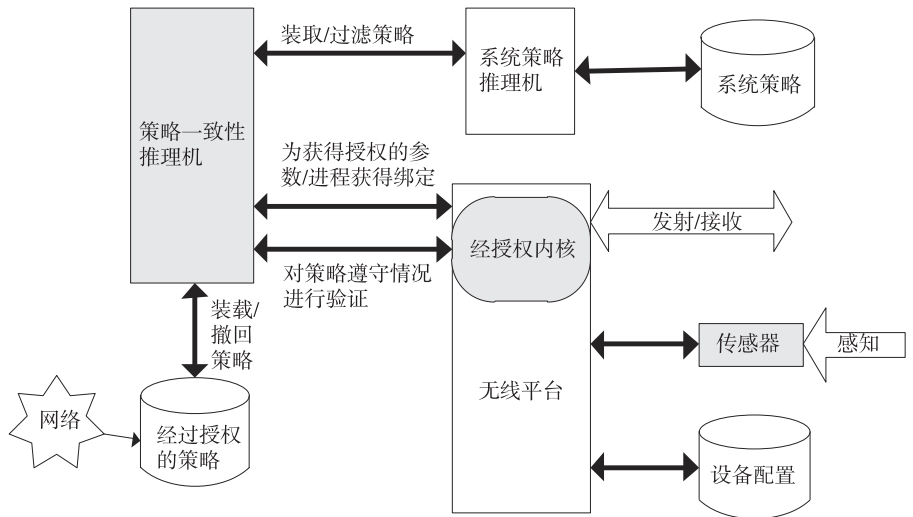


图 1 DSA 系统的一般框架

Fig. 1 The general framework of DSA system

2 原位概率因果推理

2.1 问题的形式化

因果推理模型可反映一组变量的函数因果关系。根据文献[1],确定性因果模型 C_d 可定义为一个三元组 $C_d = \langle U, V, F \rangle$, 其中 U 表示由模型外多个因素确定的一组背景变量; V 表示由背景和其他内生变量确定的一组内生变量 $\{V_1, V_2, \dots, V_n\}$, 也就是说 $V_i, i \in [1, n]$ 由 $U \cup U \setminus V_i$ 决定; F 表示一个函数集合 $\{f_1, f_2, \dots, f_n\}$, 其中每个函数 $f_i, i \in [1, n]$ 表示从各个域 $u_i \cup pa_i$ 到 V_i 的映射, $u_i \subseteq U, pa_i \subseteq V \setminus V_i$ 。整个集合形成一个从 U 到 V 的映射。也就是说, $v_i = f_i(pa_i, u_i), v_i \in V, i \in [1, n]$ 中的每个 f_i , 根据从 $V \cup U$ 挑选出来的部分变量集合的值为 v_i 分配一个数值, 且整个集合 F 有一个唯一解 $V(u)$ 。

概率因果模型 C_p 可以表示成 $C_p = \langle C_d, P \rangle$, 其中 P 表示定义于 U 域的概率函数。在其一般形式中包含 C (C_d 或 C_p) 的函数 f_i 为一个等式集合, 且该集合中的 pa_i 表示直接决定 v_i 数值的变量集合。令 u_i 表示误差或扰动, 每个等式可表示为一个线性结构等式模型(SEM)。

$$x_i = \sum_{k \neq i} \alpha_{ik} x_k + u_i, i = 1, \dots, n. \quad (1)$$

上述函数定义的关系可表示不同领域的物理关系、经济关系或具有明确概念的其他关系。鉴于函数的因果特性, 可将表示具体操作或条件的询问(query)应用到 SEM 模型上。在进行这些变换时, 从初始 SEM 模型中获得一个子模型 $C(x) = \langle U, V, F_x \rangle$, 其中 $x \subseteq V$ 。令 $X=x$ 为 x 在定义域 V 中的一个赋值, 于是得到 $F_x = \{f_i: V_i \notin X\} \cup \{X=x\}$ 。 C 到 $C(x)$ 间的转换完成后, F 也将发生变化。

另一方面, 因果微积分运算 $do(X=x)$ 可对 F 进行一连串的更改并生成 F_x 。通过某组(最小)变换将 C 变换为 $C(x)$ 。因此, $do(\cdot)$ 的微积分运算支持关于干涉的询问: “ $do(X=x)$ 运算之后 Y 将会做出什么样的反应?”, 以及反事实“如果 $X=x$, 则在 $U=u$ 条件下 $Y=y$ 是否成立?”这种类型的询问以及因果网络的预测功能, 对于决策具有重要意义。

结构性因果模型(SCM)综合了 SEM 的函数关系、潜在的结果框架及概率推理图形模型^[8-10]。因此, 每个因果模型 C_d 和概率因果模型 C_p 可分别表示为一个有向图 $G(C_d)$ 和 $G(C_p)$ 。 $V_i = f_i(pa_i, u_i)$ 的变量可表示为结点, 而有向边将母变量和背景变量 (pa_i, u_i) 及内生变量 V_i 连接起来。边的方向与从 (pa_i, u_i) 到 V_i 的影响方向一致。概率因果模型可表示为一种贝叶斯网络。 $do(\cdot)$ 运算符作用于图形结点上, 影响着被表示的变量值, 通过生成子图来回答干涉和反事实询问。

SCM 有助于 DSA 的学习, 从而提升预测效果, 进而提高系统性能。可以将 DSA 看成一个自适应过程, 将学习看成是该过程的一个补充。通过多种 DSA 方法进行学习, 比如被动观察方法、统计分析方法、关于干预响应

的观察方法、以及反事实询问方法^[11]。如上文所述,干预式询问是通过当前(感知到的)条件来预测行为结果,而反事实询问是利用假设条件来预测行为结果。因此,有了因果模型后,DSA 系统可通过策略控制机制中策略约束检测相类似的方法来研究条件、获取到的知识及行为对性能的综合效应。

可见,SCM 方法与 DSA 系统的态势感知和决策过程需求非常吻合。SCM 方法可提供基于物理现象数学表达的逻辑推理链、关于因果关系的本体信息、以及贝叶斯网络推理方法。概率推理链可基于可观察模型变量和结果变量之间的数学关系,编码信息及 $do(\cdot)$ 微积分的因果特性,支持感知发展所需要的预测、干预和反事实询问。

2.2 因果推理架构

感知和决策过程属于系统策略推理机(SSR)的范畴。它们产生并维持着态势感知(比如频谱占用率、频谱用户位置估计,路径损失特征),然后决策评估过程在策略遵守推理器明确的约束下,利用这些态势感知信息对候选行为(比如干预)做出评估。最后,着眼合规性验证和系统部署,选择并传输最具优势的候选行为。该过程可以用图 2 来描述。主要由两部分组成:一个负责态势处理,另一个负责决策处理。态势感知部分通过观察和反事实过程,对已知状态和学习概念(比如频谱占用统计数据,模型中随机变量的不确定性特征)进行表示。决策处理部分可进行评估、偏好排序及候选行为(干预)选择。这两个部分具有共同的 SCM 及多属性频谱效用函数,可对当前估计和假设世界状态进行评估,进而为干预性和反事实询问提供支持。其频谱效用函数可表示为:

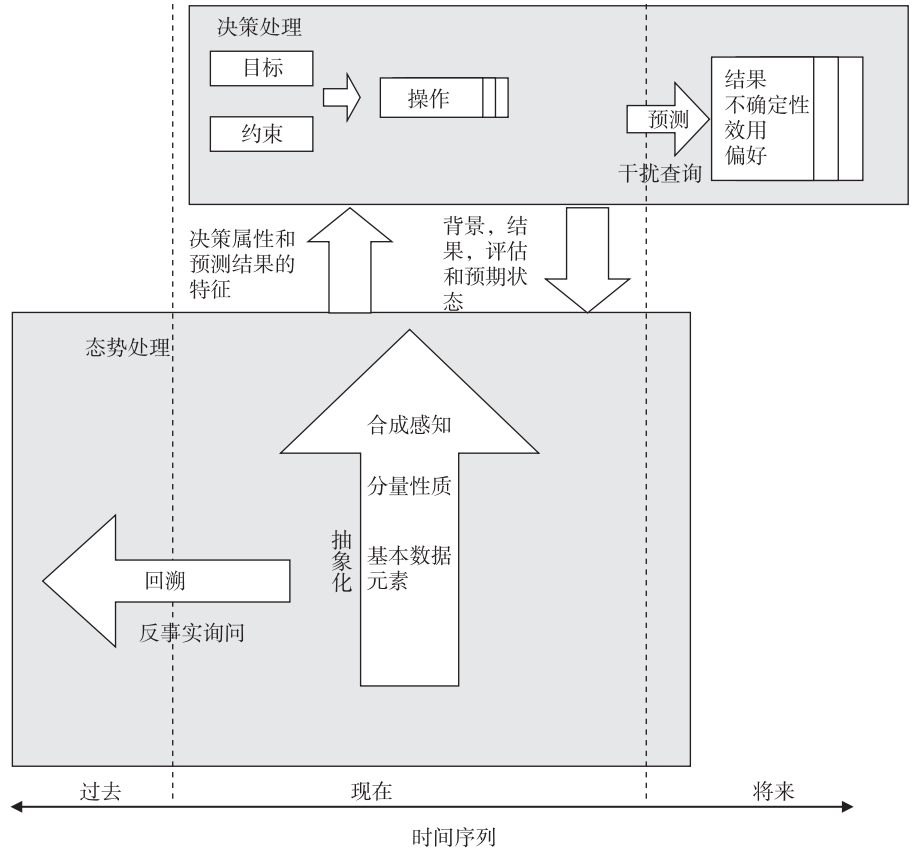


图 2 概念感知和决策处理模型

Fig. 2 The model of concept perception and decision-making

其频谱效用函数可表示为:

$$ku(x) + 1 = \prod_{i=1}^n [ku_i(x_i) + 1], \tag{2}$$

其中, $u_i(x_i)$ 表示边际效用函数。采取乘法形式将上式表示为:

$$U(L) = \prod_{i=1}^n u_i(x_i), \tag{3}$$

其中, $U(L)$ 表示“彩票决策”^[12] 效用, $u_i(x_i)$ 表示对应于属性 $x_i \in X$ (即容量、干扰和成本) 的边际效用函数。

基于效用的评估要求明确合理的属性数值、每个属性的效用函数及概率模型。物理约束和策略约束的交集,决定了合理的属性范围。由用户制定或系统制定的目标来决定合理属性数值的效用。对每个行为,已知当前对相关因素的感知及预期属性数值的估计后,方可进行概率评估。因此,属性数值和相关联的效用函数与潜在行为无关,只与目标有关;概率评估和效用评估,与行为有关。于是,必须将概率分布 $p(x_i | do(L))$ 看成是在某种干预 L 的条件下关于各属性 x_i 所有随机变量的联合概率分布。考虑到部分随机变量描述了当前和未来状态的相关属性,如果将属性水平定义为关于这些随机变量的联合概率分布,则上述概率分布反映了获得相应属性水平的概率。

期望效用 $E[U(L)]$ 为多个候选操作(即干预)的评估、偏好排序和决策提供了一种度量指标。在因果关系背景下,期望效用可被定义为结果在干预 $do(\cdot)$ 条件下的概率加权效用,表示为:

$$E[U(L)] = \sum_{x_i \in X} p(X | do(L)) \cup U(X). \tag{4}$$

于是,因果架构将 SCM 与多属性决策过程综合起来。SCM 定量描述了在某一候选干预条件下决策属性数值合理范围的概率分布。这些分布结合频谱效用函数可定量描述各种选项的期望效用。决策过程选择期望效用最高的选项。

3 因果推理的实现策略

3.1 DSA-SCM 建模

本研究选择一种基于多实体贝叶斯网络 (MEBN) 理论^[13] 和 PR-OWL^[14] 理论的方法。MEBN 理论是一种计算逻辑理论,将一阶逻辑可表达性与贝叶斯网络的不确定性表示和推理结合起来。PR-OWL 是 OWL 语言的一种拓展,目的是与非概率 OWL 相兼容,同时利用 MEBN 的公理 FOL。

MEBN 将图形概率模型表示为一个互相关联的实例及其相应属性的集合。关于实体属性及其关系的知识,被表示为一个可重复模式集合,并被称为 MEBN 段 (MFrag)。每个 MFrag 段定义了由(有条件)概率分布及 MFrag 内实体和属性之间逻辑关系共同构成的集合。通过将 MFrag 段构成的集合综合为一个表示期望概念或系统模型的 MEBN 理论 (MTheory),来定义独特的联合概率分布。该模块化方法支持采用与面向对象的编程技术相类似的方式来构建推理网络,面向对象的编程技术定义了关键元素(类)并将其作为编程的基本单元。如果 MTheory 理论的一个具体实例中所有随机变量和有条件概率分布均被明确,则这个具体实例将会生成一个态势贝叶斯网络 (SSBN)。有了与面向对象编程技术中的类相类似的模块化技术后,没有元素(即 MFrag 段)基数的先验信息也可构建基于 MEBN 的模型。因此,利用嵌入在 MFrag 段定义中的一致性规则后,便可动态呈现或删除 MFrag 段。于是,基于 MEBN 的 DSA-SCM 开发方法可满足模块化和可拓展性要求。相应地,综合使用 PR-OWL 和 MEBN 后可满足本体论要求。利用它与基于 OWL 本体论定义的兼容性,可使 SCM 基于 PR-OWL 的本体论与正在进行的 DSA 本体论开发工作保持一致。

3.2 运行实例

为了演示 SCM 采用基于 MEBN 的方法后在定义因果 SEM 方面的性能,本研究在 UnBBayes 环境下利用

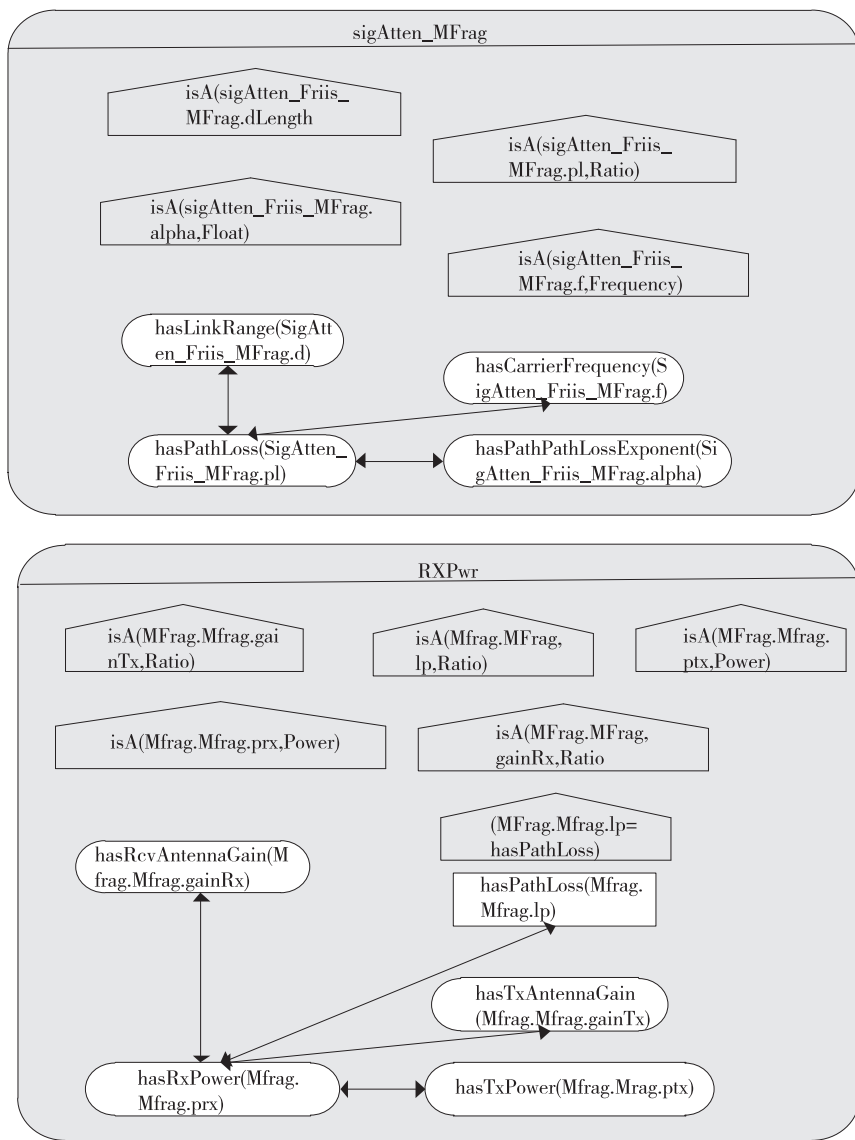


图 3 Friis 路径损耗 (上方) 和接收功率 (下方) 模型的 MFRAG 段示例
Fig. 3 The MFRAG-band illustration of Friis path loss(upper) and received power(lower) model

MEBN 和 PROWL 插件开发了一个实例。对概念函数表达以及 MEBN 提供的因果 FOL 和图形表示进行编码。同时演示了 $do(\cdot)$ 操作符的部署。在实例中, DSA 系统利用传播环境广义 Friis 模型^[8]来估计该信号对其他用户的功率。模型的函数表示可分为传播损耗模型和接收功率模型, 具体形式如下:

$$L_{p,dB} = \alpha \cdot 10 \log_{10} \left(\frac{c}{4\pi fd} \right), P_{rx,dB} = P_{tx,dB} + G_{tx,dB} + G_{rx,dB} - L_{p,dB} \quad (5)$$

上述等式重新整理后仍然保持数学上的一致性, 所以只存在一种因果表示。等式右侧的变量、参数和关系构成了左侧变量的因果表示。

$$L_{p,dB} \leftarrow \alpha \wedge f, P_{rx,dB} \leftarrow P_{tx,dB} \wedge G_{tx,dB} \wedge G_{rx,dB} \wedge L_{p,dB} \quad (6)$$

这些函数和逻辑配对中的每一个配对均可表示为图 3 中的 MFrag 段。每个 MFrag 段均表示可在任意模型中进行多次实例化的基本单元(即子模型规格)。于是, 将传输损耗和接收功率分为两个 MFrag 段后, 它们均可在模型实例中独立使用。例如, 表示候选传播模型的 MFrag 段(比如 Hata, COST 123^[6]), 在开发后可与其他 SCM 中的接收功率 MFrag 段相配对。

为了将 SCM 实例作为一个概率因果模型进行演示, 假设 DSA 系统希望确定它某个频谱用户处的信号功率, 且该频谱用户的位置和相应信道特征存在一定程度的未知性。利用 MFrag 创建图 4 所示的贝叶斯网络, 进而根据(5)和(6)式中明确的函数和逻辑关系确定概率因果模型。为了预测其他频谱用户处的接收功率, DSA 系统必须利用 $do(\cdot)$ 运算符进行一次干预式询问, 其中 $L \equiv (\alpha, d, f, P_{tx}, G_{tx}, G_{rx})$ 定义了 SCM 变量的值如表 1, 同时生成联合概率分布 $p(P_{rx} | do(L))$ (图 5)。DSA 系统可利用该分布来确定在已知 SCM 和干预 L 的随机变量条件下, 能够满足接收功率(比如面向接收器)干扰要求和置信度的概率。换句话说, DSA 系统可以通过询问 SCM 来确定满足指定阈值的最大允许 P_{tx} 。

3.3 仿真结果与讨论

为了测试本研究提出的概率推理方法的性能, 本节主要考察不同位置和传播不确定性水平下的最大无干扰发射功率 MIFTP 的变化, 并讨论达到概念策略和 FCC 策略一致性时的最佳参数组合。给定一个频率捷变无线电(FAR)节点 a 和一个发射器 p , MIFTP 被定义为节点 a 在给定频道上的最大传输功率, 使得对在 p 覆盖范围内的其他节点 v 的干扰概率小于规定的阈值。干扰概率可以用公式表示为:

$$P(a) = Q \left(\frac{i_{\max} - s_a + g(\Delta d)}{\sigma_w} \right), \quad (7)$$

其中, $\Delta d = d_{a,p} - d_{cov}(p)$ 表示距离的不确定性变化尺度, $Q(\cdot)$ 是一个标准的 Q 函数, s_a 为节点 a 的传输功率, i_{\max} 为干扰的容忍阈值, $g(\cdot)$ 表示路径损耗分量。那么, MIFTP 表示为:

$$s_a^* = \max \{ s_a : P(a) \leq \zeta, \forall v : d_{p,v} \leq d_{cov}(p) \}. \quad (8)$$

与先验定义可处理最坏情况的不确定性主流水平

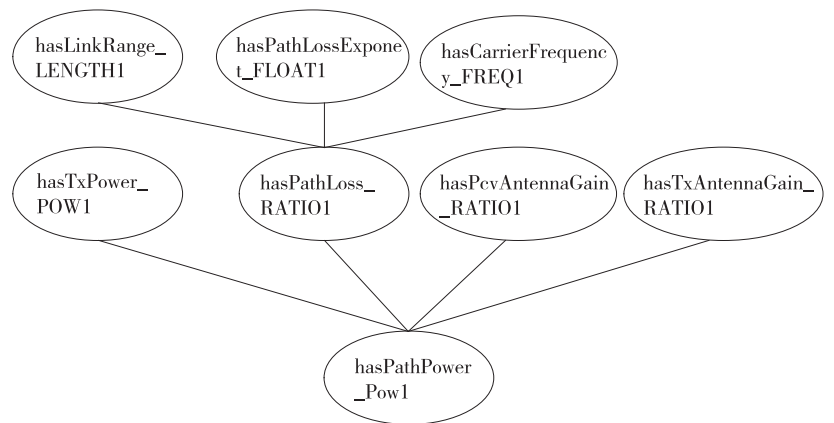


图 4 接收功率 SCM 示例的 BN 表示

Fig. 4 The BN presentation of received power of SCM instance

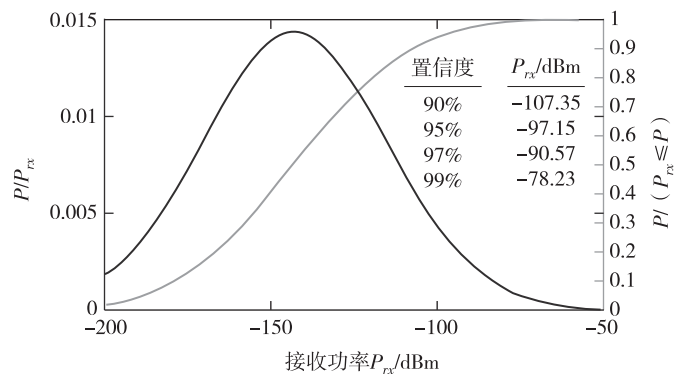


图 5 SCM 示例的接收功率分布

Fig. 5 The distribution of received power of SCM instance

表 1 SCM 变量与值

Tab. 1 SCM variables and values

| RV | 定义 | 数值 |
|------------------|------------|-----------------------|
| α | 传播损耗指数 | $N(3.5, 0.2)$ |
| d | 与受保护用户的距离 | $N(500 \text{ m}, 5)$ |
| f | 载波频率 | 2.5 GHz |
| P_{tx} | 发射功率 | 24 dBm(250 mW) |
| G_{tx}, G_{rx} | 发射器和接收器的增益 | 0 dB |

相比,原位确定策略可使 DSA 系统的性能最大化。例如文献[9]中关于 TV 波段使用的 FCC 策略利用便携式“TV 波段设备”(TVBD)来实现 50 m 精度的位置定位,同时可访问包含授权发射区域和注册无线话筒位置的数据库。只要这些设备与任何无线话筒位置的距离维持在 400 m 最小水平,那么这些设备便可在授权区域中以 100 mW(20 dBm)发射信号。文献[15]提倡基于感知的策略,当 $P_{tx} < 20$ dBm 时,与无线话筒位置的最小距离为 130 m。因此,态势感知能力(比如定位和读数)会影响干扰防御能力。然而,策略是针对某一种具体的态势感知方法而制定,在应用时与更为剧烈的传播损耗等态势变化无关。

概率 SCM 方法为管理灵活性和 DSA 性能更高的策略提供了一种表示方法。假设部署了一种更为灵活的策略,且该策略仅仅规定 DSA 系统对无线话筒接收器施加的信号功率不得高于 60 dBm。此时信号功率的计算以它 99% 的局部传播和距离不确定性(α_{99} 和 Δd_{99})为基础。因此,SCM 经过合理定义且具有局部环境感知功能的 DSA 系统可根据原位环境状况和感知不确定性来调整其功率,并与感知的获取方式无关。图 6 给出了不同位置和传播不确定性水平组合条件下,DSA 系统继续保持遵守上述策略时的最大无干扰发射功率。结果表明, $\alpha_{99} = 2$ (即自由空间传播)、距离为 400 (± 50)m、功率为 20 dBm 时,概念策略和 FCC 策略相吻合。

通过基于概率推理的灵活策略,显著提高了对相隔距离和 MIFTP 的要求。随着传播感知呈线性增长,MIFTP 对传播的不确定性非常敏感,对位置不确定性具有较强的容忍性,与距离存在对数线性关系。因此,原位概率推理能力有助于制定和部署灵活策略,进而提高频谱的可访问性。

4 结语

利用概率因果结构模型对 DSA 系统中存在的不确定性进行推理和决策支持,可以使系统管理、系统标准化、系统实现更具灵活性,并在静态频谱分配政策造成频谱资源紧张的情况下,提高已分配频谱的利用率、解决频谱资源和业务需求的矛盾。从管理和技术层面解决当前频谱工程技术领域出现的问题、强化有效态势感知的基础、实现对操作环境的全面评估。

参考文献:

- [1] CHANDRASEKHAR V, ANDREWS J G, GATHERER A. Femtocell networks: a survey[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(9): 59-67.
- [2] DAI Y, DANIELS A, WU J. Demo: recommendation system for dynamic spectrum access through spectrum mining and prediction[C]//Proceedings of the 15th ACM international symposium on mobile ad hoc networking and computing. New York, USA: ACM, 2014: 415-416.
- [3] 朱江,熊加毫,陈红翠. 认知无线网络中基于 HJ-DQPSO 优化的频谱分配机制[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2016(1): 37-44.
- [4] ZHU J, XIONG J H, CHEN H C. Spectral allocation mechanism based on HJ-DQPSO for cognitive radio networks[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2016(1): 37-44.
- [5] LI T L, CHOU C T, HSU L K. Proportional sharing in distributed dynamic spectrum access-based networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2015, 14(1): 155-168.
- [6] 贺新颖,曾志民,郭彩丽. 基于概率密度估计的认知无线电动态频谱接入算法[J]. 北京邮电大学学报(自然科学版),

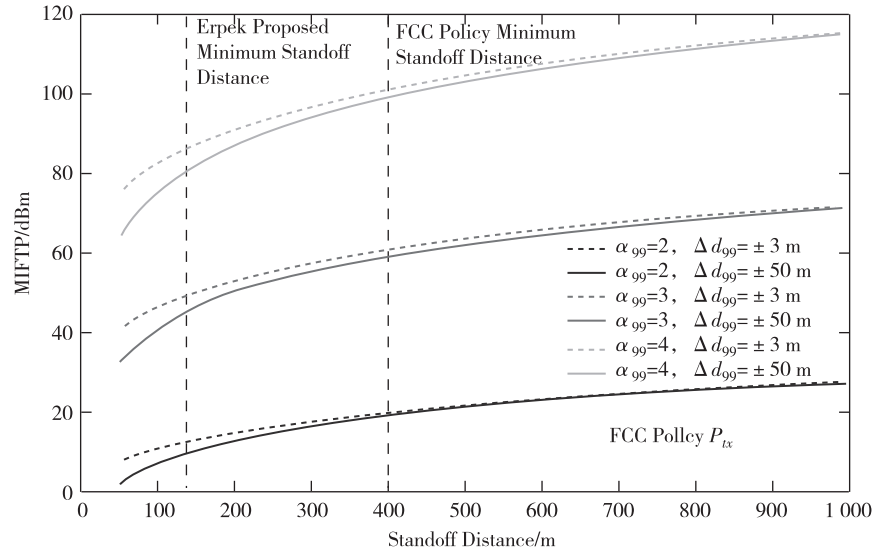


图 6 基于原位概率推理的概念性 DSA TV 波段设备策略的最大无干扰发射功率(MIFTP)

Fig. 6 The maximum interference-free transmit power (MIFTP) of conceptual DSA TV band equipment strategy based on the in-situ probabilistic reasoning

- 2009, 32(1):108-112.
- HE X Y, ZENG Z M, GUO C L. Adynamic spectrum access algorithm based on probability density estimation in cognitive radio[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2009, 32(1): 108-112.
- [6] 吴非, 陈劫, 廖楚林, 等. 认知无线网络中基于需求的多小区频谱分配算法[J]. 计算机应用, 2008, 28(1):14-16.
- WU F, CHEN J, LIAO C L, et al. Demand-based spectrum allocation algorithm in multi-cells cognitive radio network [J]. Journal of Computer Applications, 2008, 28(1):14-16.
- [7] 刘军, 谢秀峰. 基于排队时延及博弈分析的认知无线网络信道分配算法[J]. 通信学报, 2012, 33(6):73-81.
- LIU J, XIE X F. Cognitivenetwork channel allocation method based on the queuing delay and game analysis[J]. Journal on Communications, 2012, 33(6):73-81.
- [8] LIEN S Y, TSENG C C, CHEN K C, et al. Cognitive radio resource management for QoS guarantees in autonomous femtocell networks[C]//Communications (ICC), 2010 IEEE international conference. New York, USA: IEEE, 2010:1-6.
- [9] HARJULA I, HEKKALA A. Spectrum sensing in cognitive femto base stations using welch periodogram [C]// 2011 IEEE 22nd international symposium on personal, indoor and mobile radio communications. New York, USA: IEEE, 2011:2305-2309.
- [10] MOOIJ J M, JANZING D, SCHÖLKOPF B. From ordinary differential equations to structural causal models: the deterministic case[J]. arXiv Preprint arXiv: 1304.7920, 2013.
- [11] 时颖, 林茂六. 基于动态频谱接入机制的侦测与避让技术评述[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2010, 22(6): 739-744.
- SHI Y, LIN M L. A review of detect and avoid technology based on dynamic spectrum access mechanism[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2010, 22(6):739-744.
- [12] 王朝岗, 蔡发书, 刘银川. 认知无线网络频谱协作感知能耗与吞吐量的凸优化研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2015, 27(4):506-513.
- WANG C G, CAI F S, LIU Y C. Convex optimize the energy consumption and throughput of cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2015, 27(4):506-513.
- [13] PARK C Y, LASKEY K B, COSTA P C G, et al. Multi-entity Bayesian networks learning for hybrid variables in situation awareness[C]//Information fusion (FUSION), 2013 16th international conference. New York, USA: IEEE, 2013:1894-1901.
- [14] CARVALHO R N, LASKEY K B, COSTA P C G, PROWL 2.0-bridging the gap to OWL semantics[M]. Uncertainty Reasoning for the Semantic Web II, Springer Berlin Heidelberg, 2013:1-18.
- [15] WANG Y, REN P, DU Q, et al. A channel-aggregation diversity based MAC protocol in power-constrained cognitive ad hoc networks[C]//Global telecommunications conference (GLOBECOM 2011), 2011 IEEE. New York: IEEE, 2011.

An Achievable Causal Reasoning for DSA Situational Awareness and Decision-making

WU Dongmin¹, HU Daidi²

(1. Dean's Office, Chongqing Normal University, Chongqing 401331;

2. Sias International College, Zhengzhou University, Xinzheng Henan 451150, China)

Abstract: [Purposes] Regarding whether a system can accurately determine the running state of in-situ consistency, current approaches in the literature generally develop global operation constraints based on a priori model to achieve the low risk and high cost. To remedy the defects, this paper proposes a stochastic reasoning method for dynamic spectrum access (DSA) situation sensing and decision making. [Methods] It uses the probability structure causal model and multiple attribute decision-making theory in environment perception and decision making of DSA system to obtain the advantages of concept definition, flexibility and potential efficiency and then uses the first-order logic and DSA intrinsic uncertainty to perceive and make decision. [Findings] The mathematical expression of reasoning structure is constructed and a DSA-SCM probability modeling method based on multi-entity Bayesian network (MEBN) is implemented. [Conclusions] The in-situ probabilistic causal reasoning proposed in this paper performs much higher and more flexibility.

Keywords: dynamic spectrum access; probabilistic causal reasoning; multi-attribute decision theory; situational awareness

(责任编辑 游中胜)