

文章编号: 1672-2892(2010)06-0747-05

基于本体的认知无线电知识表示与推理

王英伦^{1a}, 李磊民^{1b}, 黄玉清^{1a}, 潘泽友²

(1.西南科技大学 a.信息工程学院; b.国防科技学院, 四川 绵阳 621010; 2.西南计算中心, 四川 绵阳 621900)

摘要: 对知识进行有效建模是认知无线电(CR)引擎设计中关键问题之一。本文提出基于本体的认知无线电知识表示模型。首先对自然语言描述的CR知识进行概念抽取和类分析, 并利用网络本体语言实现CR知识本体, 最后对本体进行推理。实验结果表明, 该方法支持知识的共享与重用, 能够对异构的无线电知识进行融合, 并实现了CR对自身状态和外界环境的理解, 为参数重构提供决策依据。

关键词: 认知无线电; 知识表示; 本体; 本体推理

中图分类号: TN914; TP274

文献标识码: A

Ontology-based knowledge representation and reasoning for cognitive radio

WANG Ying-lun^{1a}, LI Lei-min^{1b}, HUANG Yu-qing^{1a}, PAN Ze-you²

(1a.School of Information Engineering; 1b.School of National Defense Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621010, China; 2.Southwest Computing Center, Mianyang Sichuan 621900, China)

Abstract: Effective knowledge modeling is one of the key issues in Cognitive Radio(CR). This paper proposes an ontology-based model for CR knowledge representation. Concept extraction and class analysis is performed for CR knowledge described by natural language, and web ontology language is adopted to implement the ontology of CR knowledge. Then reasoning is conducted with the ontology. The experiment result shows that the proposed method supports knowledge sharing and reuse, can integrate heterogeneous radio knowledge, and enables CR to understand their own state and external environment, which provides the basis for CR reconfiguration in decision-making.

Key words: Cognitive Radio; knowledge representation; ontology; ontological reasoning

无线电频谱是不可再生资源, 必须有效利用。来自 Shared Spectrum 公司的 1 份测量报告表明: 在美国 3 GHz 以下频段, 平均频谱利用率仅有 5.2%, 很大一部分时间是空闲的, 然而传统的固定频谱分配不准许未授权的无线电使用授权频谱, 严重降低了频谱的利用率。认知无线电(CR)技术在软件无线电基础上, 结合人工智能, 实现无线电对频谱资源的有效利用^[1]。其核心思想是设计认知引擎, 使其能够感知外界环境, 具有智能学习和推理能力, 通过重配置通信参数, 实现动态频谱分配和频谱共享, 以此适应外界环境并满足用户要求^[2-5]。知识表示是 CR 中的关键技术之一。CR 与外界环境和用户需求之间, 以及 CR 内部信息交互, 可以抽象成知识的表达与交互。目前关于 CR 系统的知识表示仍存在很多不足。RKRL 是瑞典皇家科学院专为 CR 开发的一套语言, 它基于帧结构, 并且支持基于模式的推理^[6], 但其约束性不强, 仅靠上下文(context)定义, 无法解决重复词汇带来的歧义性; 而且句法复杂, 语义解析与推理需要多种语言编写复杂的程序。文献[7-8]研究了本体(ontology)的信息交互, 在此基础上, 文献[9]研究了基于 Prolog 的语义网规则语言推理器, 以提高推理的速度。但是这些文献只是利用本体实现数据信息的交互, 为 CR 之间的信息问询与响应提供了一种带语义的数据格式, 没有研究针对无线电的知识抽取与建模方法; 推理机制也存在不足, 用于存储的知识与用于推理的知识必须进行相互转换, 大大降低了推理的效率。本体是面向领域的概念化、形式化描述, 它是多个代理(应用程序)之间的概念及其关系的描述。随着网络应用的进一步推广, 需要在网络环境下对知识进行共享的要求越来越高。本文研究了本体知识模型在网络环境下的不同代理之间的知识共享、集成与重用。由于网络本体语言(Web Ontology Language, OWL)支持 Web 技术, 因此选择 OWL 语言来实现 CR 知识本体。

收稿日期: 2010-03-10; 修回日期: 2010-05-27

基金项目: 综合业务网理论及关键技术国家重点实验室(西安电子科技大学)资助项目(ISN10-09)

1 CR 知识获取与建模

1.1 知识本体与 CR 环境理解

基于 CR 的智能性要求, 外界环境信息所涉及的领域越来越广, 感知技术无法对多领域的概念及其关系进行建模。知识工程作为人工智能领域的重要部分, 能够为 CR 多领域信息的表达提供有效的方法。在 CR 结构中以数据为研究对象, CR 与外界环境的关系是感知, 处于感知层; 如果以知识为研究对象, CR 与外界环境的关系是理解, 处于理解层。感知层为理解层提供服务, 见图 1。在 CR 知识本体模型中, 本体为多领域的概念、属性及其关系提供了有效的模型。在重用方面, 本文直接使用较通用的本体, 在其基础上进行具体的扩展; 或者将其它相关研究中的已有本体整合到自己的本体中。在共享方面, 不同的认知设备分别运行不同的软件协议, 通过 Web 技术共享各自的 CR 知识本体, 那么 CR 将积累越来越多的信息。

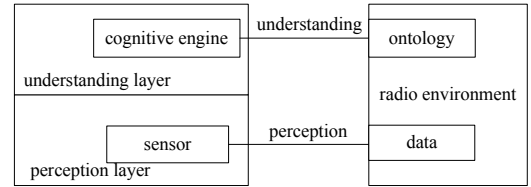


Fig.1 Layer structure for CR understanding of environment
图1 CR环境理解的分层结构示意图

1.2 目标驱动的本体建模方法

在本文 1.1 节中分析了知识在 CR 中的作用, 下面论述基于本体的无线电知识建模过程。本体建模有主观任意性, 面对 CR 领域的繁杂概念, 需要一种思路清晰的方法对领域进行概念抽取和本体建模。在 CR 应用中, 相对于场景、过程、方法等概念, 目标更加直接地反映了认知设备的本体需求, 因而也是知识系统中最稳定的信息; 同时, 目标的明确化和精简过程使得复杂的无线系统更加容易理解。因此本文提出了目标驱动的本体建模方法。

目标驱动机制是知识本体建模的核心, 直接产生本体模型的概念、属性及其关系。首先针对自然语言描述的无线电知识定义一个目标, 以此目标为知识研究的主线, 逐一抽取相关的领域概念及其属性(Attribute), 然后对概念之间的关系进行定义, 其关系又可作为概念的属性(Property)。当概念、属性及其关系定义完毕后, 即可实现其本体模型。由于本体建模没有固定的模式, 也没有绝对正确的结果, 因此本体模型需要进行迭代式的设计, 不断地修改本体。在迭代程序中的反馈支路由任务建模和推断分析构成。参考最初定义的目标, 结合特定的无线场景和 QoS 需求, 建立任务模型, 对任务模型进行推断分析。推断分析的结果作为目标修正和本体修正的依据, 具体表现在概念、属性及其关系的重定义。最后对执行任务的方法进行策略建模。基于目标驱动的本体建模过程见图 2。

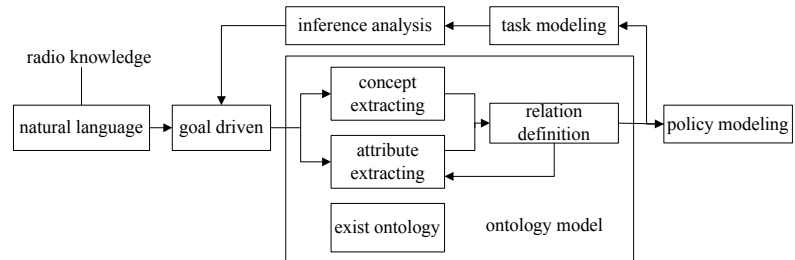


Fig.2 Knowledge extracting based on goal driven
图2 基于目标驱动的知识获取示意图

1.3 CR 应用的目标成分分析

目标驱动机制为描述客观世界提供一条主线, 符合 CR 的动态适应特性。在 CR 领域, 本体知识用于认知设备对自身状态以及无线环境的“理解”, 根据服务质量需求做相应的参数调整。因此, 针对特定的无线场景, 为认知设备定义一个相应的目标。以目标为研究主线, 分析目标包含的成分结构。行为集合 $C_{\text{action}} = \{O_{\text{init}}, O_{\text{finish}}, O_{\text{preceive}}, \dots\}$ 表示达到目标所采取的动作。初始化、感知等一般行为模型不适合作为特定概念的行为属性, 可以将此类具有一般性的行为模型表示为抽象概念, 利用面向对象 Java 语言的抽象接口来实现。行为参数集合 $C_{\text{act-param}} = \{O_{\text{obj}}, O_{\text{tool}}, O_{\text{method}}, O_{\text{constrn}}, \dots\}$ 表示与行为相关的属性参数集, 是广义的参数概念。与目标直接或间接联系的参数概念, 如目标的主体对象、受体对象, 目标所使用的工具、方法以及相关约束都作为目标的行为参数集, 为领域知识提取概念, 建立本体提供指导。最后, 基于目标驱动的概念、属性集合为 $C_{\text{goal}} = C_{\text{action}} \cup C_{\text{act-param}}$ 。

下面针对自然语言描述的知识, 研究利用目标驱动机制进行概念抽取。针对某一无线场景下的 CR 应用, 将其认知、配置过程以目标形式整理成以下知识: “为了实现无线节点任何时间、任何地点的可靠通信, 1) 需要感知频谱, 或搜寻可以进行端到端通信的邻近节点, 请求频谱占用表; 2) 根据频谱占用情况, 选择可用频段, 同时向邻近节点发送训练比特来估计无线信道的特征参数; 3) 根据信道的衰落特性选择调制解调方案、编码方案以及信道均衡方案; 4) 根据网络拓扑结构和节点密集情况选择 MAC 协议, 并接入信道; 5) 根据带宽大小选择数据速率以及业务类型。”

对于第 4)个目标，为了决定节点 MAC 协议，可以拆分成以下子任务：a) 节点监测公共信道频段；b) 节点接收 MAC 配置帧，判断频谱使用表中是否有可用频段，如果有可用频段，继续进行以下分析；c) 判断网络的密集程度：密集、中等和稀疏；d) 判断信道带宽的大小：宽、窄；e) 分析节点的业务类型：数据、语音和视频。

根据此目标寻找研究领域相关的抽象概念具体对象(O)，定义对象属性(A)以及对象之间的关系(R)。每一个领域对象由一系列属性构成，这些属性通过定义相应的函数过程(F)来实现，即 $F:O \rightarrow V$ ， V 为属性值集合。对于上面的决定节点 MAC 协议的子任务，抽象概念具体对象包括信道、帧、频谱等，对象属性包括密集度、频段、带宽以及业务类型等，以及属性值集合。以下为与信道相关的概念和关系：

- Objects(O): $O1: channel \Rightarrow propagation media of wireless signal$
- Attribute(A): $A1: bandwidth \Rightarrow certain frequency range that wireless signal uses$
- Values(V): $V1: broad \Rightarrow the bandwidth size of channel$
- Task(T): $T1: determine channel bandwidth \Rightarrow determine the channel bandwidth belongs to wide or narrow$
- Relation(R): $R1: time-slot is a kind of channel \Rightarrow an equivalence relation$

抽象概念 $O1$ 表示信道对象，对象属性 $A1$ 表示信道的带宽，属性值集合如带宽取值 $V_1=\{broad,narrow\}$ ，表示信道包括宽带和窄带这 2 种类型，密集度 $V_2=\{dense,moderate,sparse\}$ 表示网络节点的密集程度量化为密集、中等和稀疏，业务类型 $V_3=\{data,voice,vidro\}$ 表示节点的业务类型包括数据、语音和视频。在行为参数集合中 $O1,A1,V_1,V_2,V_3 \in O_{obj}$ 。

2 CR 知识的本体设计

2.1 CR 知识本体的类层次分析

本体模型作为知识级的建模实体，对知识进行概念抽取和属性定义后，建立本体的类层次。知识一般依赖于特定领域，直接针对某一特定系统进行分析与建模受限于领域的特殊性，所以知识本体要根据知识与特定领域依赖的程度分层建模。本文采用两层类结构来描述 CR 知识本体。顶层模型应该与领域无关，或相关性很小，该层次的概念能够被相关领域的专家和多数用户理解。领域层模型定义与特定领域相关的概念、关系和任务。

顶层模型包括类、过程和关系。类可以划分为具体事物和抽象概念。关系用于建立类间或类属性间的联系，可以进一步划分为二元关系、多元关系和实例关系。实例关系描述类的对象具有一系列属性。领域层模型包括与无线通信领域相关的类对象和任务。类本体包括由目标驱动机制分析得到的具体事物与抽象概念。本文设计了数据链路协议的 CR 知识本体，其中具体事物类包括帧(Frame)和域(Field)；抽象概念包括信道(Channel)、协议(Protocol)。过程本体包括监测公共信道频段，判断频谱使用表中是否有可用频段，计算信道的时延扩展，测量信道带宽并判断大小，判断网络的密集程度，以及其他协议层的为建立可靠连接或维持连接所涉及的过程。

2.2 CR 知识本体的实现机制

通信本体的重要作用在于机器理解。CR 中的软件协议一般通过面向对象语言实现，由编译器管理类之间的继承关系，作为类属性的成员变量和成员方法的涵义无法被应用程序理解。通信本体实现 CR 对自身软件协议的理解，并支持 CR 在理解和推理的基础上做出相应的动作。

因此，本文采用 OWL 本体描述语言，首先将应用程序中的类同名映射到 OWL 本体类中，并通过引用来绑定应用程序和 OWL 本体中同名类的对象，接着将应用程序的变量属性和方法属性重新定义为 OWL 本体中的属性，从而实现应用程序的本体功能。OWL 本体的类和属性定义功能丰富，而且对关系属性有完善的表示机制，利用 OWL 本体的推理能力，容易实现应用程序对软件自身的理解，进而实现 CR 对自身状态和外界环境的理解，见图 3。本文在本体的 OWL 代码设计中利用了 Protégé。Protégé 是斯坦福大学研发的本体设计工具，用于辅助设计 OWL 代码。但是，由工具生成的 OWL 代码灵活性和准确性较差，最后需要手工继续编写并完善 OWL 代码。下一小节将论述基于 Protégé 的 OWL 本体设计，并对本体进行推理。

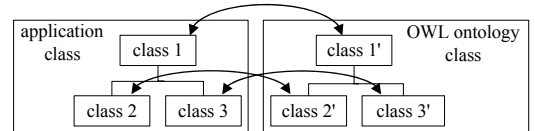


Fig.3 Model of ontology for CR knowledge
图 3 CR 知识本体的实现模型

2.3 CR 知识本体的推理

由于 CR 的学习与推理系统的多样性，知识形式是异构的。规则库使用 If-Then 规则的知识，基于案例推理的系统 and 决策树系统使用数据库，演绎推理系统使用霍恩子句。然而，认知引擎各部分之间需要数据或知识的交

互, CR 之间需要互操作, 因此不同知识结构之间的融合是知识表示的重要内容之一。OWL-DL 本体语言通过对词条(Term)进行约束, 赋予了机器理解能力, 使得基于 OWL 的本体能够对异构知识进行融合。If-Then 规则是专家系统常用的知识表示形式, 通过对规则的条件和结果进行类定义与关系描述, 将规则转换为本体, 实现异构知识融合。

在通过本体对异构知识融合后, 即可对知识本体进行推理。针对本体的推理, 采用 Racer 推理机。Racer 推理机针对具体的 OWL 本体应用, 采用描述逻辑作为理论基础, 推理系统做了大量的优化工作, 其推理效率很高。

通信本体的推理包括概念的可满足性(satisfiability)和概念的包含关系(subsumption)。在文献[9-10]中定义了若干规则, 如: If a frame belongs to the HDLC protocol, then the address field has 8 bits.

为了实现本体知识的推理, 本文利用 Protégé 进行 OWL 本体描述, 将上述 If-Then 规则转换成本体知识。以 HDLCField 为例, 其具体过程: 通过 owl:intersectionOf 将 HDLCField 类定义成 AddressField 类和属性约束(owl:Restriction)之间的交集。属性约束通过 containedIn 和 protocol 定义, 表达式为 $\text{AddressField} \cap (\cap \text{containedIn}(\text{protocol} \cap \text{HDLC}))$ 。该表达式作为 HDLCField 类的属性, 表示某类地址域是帧的一部分, 而且该帧的协议为 HDLC。其中 HDLC 是 Protocol 类的 1 个实例, protocol 属性是 1 个 FunctionalProperty, 其取值集合 Range 为 Protocol 类的实例集合。接着, 将上述表达式定义为 HDLCField 的充分必要条件。因为 OWL 的描述逻辑中的推理是基于开放世界假设(Open World Assumption), 本例中没有明确指出帧不能使用其它协议, 所以帧使用其它协议这个陈述是未知的, 而不是假的, 这样就给推理造成了影响, 所以要明确定义 HDLCField 类型的帧使用 HDLC 协议, 也就是充分必要条件。最后将此类帧的地址字段长度指定为 8 bit。

实例: 根据以上 If-Then 规则转化的 OWL 本体, 定义一个 field1 类, 已知 field1 具有地址字段, 其协议使用 HDLC, 通过 Racer 推理, field1 类已经置于 HDLCfield 类层次下, HDLCfield 类所具有的属性, 均被 field1 类继承, 推理结果为该 field1 具有长度为 8 bit 的地址域, 协议栈的上层应用程序即可对该 field1 对象进行正确的处理。由此可见, 利用本体所蕴含的信息实现了未知属性的推理。图 4 和图 5 分别为推理前、后的类关系图。

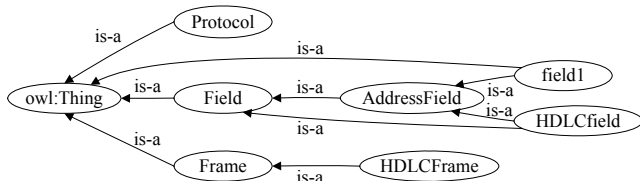


Fig.4 Relation of Class before reasoning
图4 推理前的类关系图



Fig.5 Relation of Class after reasoning
图5 推理后的类关系图

3 结论

本文针对知识本体与 CR 环境理解的关系, 提出 CR 环境理解的分层结构, 并研究了目标驱动的本体建模与知识表示。设计的数据链路知识本体可以有效地表达协议概念及其关系。在 CR 知识本体设计中, 利用应用程序与本体的相互映射, 实现了软件协议的本体功能。最后利用 Protégé-OWL 本体开发工具实现 CR 本体, 并利用 Racer 进行了本体推理, 实现了 CR 对自身协议的理解。但是, 基于本体的 CR 知识表示仍存在许多问题, CR 的静态知识能够获得有效的表达, 而面对变化迅速的无线环境, 需要研究一种有效的冲激响应机制来对本体建模, 实现动态知识表示。因此, 下一步的研究重点将放在如何实现动态本体, 以使 CR 更好地适应环境。

参考文献:

- [1] Mitola J III, Maguire G Q Jr. Cognitive radio: making software radios more personal[J]. Personal Communications, 1999, 6(4): 13-18.
- [2] Haykin S. Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220.
- [3] Wang Jiao, Huang Yuqing, Jiang Hong. Improved Algorithm of Spectrum Allocation Based on Graph Coloring Model in Cognitive Radio[C]// 2009 International Conference on Communication and Mobile Computing(CMC). Kunming: [s.n.], 2009, 3: 353-357.
- [4] Huang Yuqing, Jiang Hong, Hu Hong, et al. Design of Learning Engine Based on Support Vector Machine[C]// Proceedings of 2009 International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering(CiSE2009). Wuhan: [s.n.], 2009: 54-57.

- [5] Huang Yuqing, Wang Jiao, Jiang Hong. Modeling of Learning Inference and Decision-Making Engine in Cognitive Radio[C]// 2010 Second International Conference on Networks Security Wireless Communications and Trusted Computing. Wuhan:[s.n.], 2010,2:258-261.
- [6] Mitola J III. Cognitive radio:An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio[EB/OL]. (2000-05-08)[2010-03-01]. http://web.it.kth.se/~maguire/jmitola/Mitola_Dissertation8_Integrated.pdf
- [7] Wang J, Brady D, Baclawski K, et al. The Use of Ontologies for the Self-Awareness of the Communications Nodes[C]// Proceedings of the Software Defined Radio Technical Conference-SDR03. Orlando, FL:[s.n.], 2003.
- [8] Wang J, Kokar M, Baclawski K, et al. Achieving Self-Awareness of SDR Nodes Through Ontology-Based Reasoning and Reflection [EB/OL]. [2010-03-01]. <http://www.sdrforum.org/pages/sdr04/2.4%20Software%20Kokar/2.4-3%20Kokar.pdf>.
- [9] Baclawski K, Brady D, Kokar M. Achieving Dynamic Interoperability of Communication at the Data Link Layer Through Ontology Based Reasoning[EB/OL]. [2010-03-01]. <http://groups.winfrum.org/d/o/do/2708>.
- [10] 余晓航, 李磊民, 黄玉清. 基于粗糙集和决策树方法的认知无线电知识挖掘[J]. 信息与电子工程, 2010, 8(5):607-611. (YU Xiaohang, LI Leimin, HUANG Yuqing. Knowledge Discovery for Cognitive Radio Based on Rough Set and Decision Tree Method[J]. INFORMATION AND ELECTRONIC ENGINEERING, 2010, 8(5):607-611.)

作者简介:



王英伦(1985-), 男, 吉林省吉林市人, 在读硕士研究生, 主要从事认知无线电技术方面的研究. email:yinglun_007@163.com.

李磊民(1960-), 男, 辽宁省辽阳市人, 教授, 主要研究方向为嵌入式系统应用、网络测控.

黄玉清(1962-), 女, 四川省三台县人, 教授, 主要研究方向为认知无线电技术、网络测控、智能控制.

潘泽友(1955-), 男, 四川省绵阳市人, 教授, 主要研究方向为无线网络测控、嵌入式系统应用.

2010年度《信息与电子工程》优秀论文及作者名单

- | | |
|-----|------------------------------|
| 高 敏 | 《基于正交小波变换的前馈神经网络盲均衡算法》 |
| 李城鑫 | 《改进的多用户 OFDM 系统子载波和比特分配算法》 |
| 漆莲芝 | 《故障树分析测试用例生成技术研究与应用》 |
| 王 军 | 《线性调频-伪码卷积性复合信号 MCRLB 推导》 |
| 王浩锋 | 《基于 BP 神经网络的民用航空航段安全风险评估》 |
| 张迎晓 | 《基于 Dec-POMDP 的认知无线网络频谱接入算法》 |
| 张守勇 | 《一种新的变步长 ELMS 算法在噪声抵消中的应用》 |
| 周 斌 | 《雷达系统超精简流式 AES 加密器设计和优化》 |