

## 人工智能技术在认知无线电中的应用

刘怡静<sup>1,2</sup>, 李大白<sup>3</sup>, 魏政霞<sup>4</sup>

(1. 解放军理工大学 通信工程学院 研究生管理大队四队, 江苏 南京 210007;

2. 中国电子系统设备工程公司, 北京 100141;

3. 中国人民解放军 91630 部队, 广东 广州 510320;

4. 总参通信训练基地有线研究室, 河北 张家口 075100)

**摘要:** 认知无线电技术是无线通信领域与人工智能领域相结合的产物, 智能性是其区别于传统无线电的本质属性。先进的人工智能技术在无线电中的成功应用是实现认知无线电的关键。首先介绍了凝聚认知无线电智能思想的认知循环, 并对认知无线电的智能实现载体认知引擎, 进行了简要描述, 说明了人工智能技术在认知无线电实现中的重要作用; 然后, 从推理、学习和优化的角度对适用于认知无线电的几种人工智能技术进行了总结归纳; 最后, 介绍了人工智能技术在现有的认知引擎中的应用。

**关键词:** 认知无线电; 人工智能; 认知引擎; 推理系统; 机器学习; 智能优化算法

**中图分类号:** TN92      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-3114(2011)02-51-4

## Application of Artificial Intelligence to Cognitive Radio

LIU Yi-jing<sup>1,2</sup>, LI Da-bai<sup>3</sup>, WEI Zheng-xia<sup>4</sup>

(1. Postgraduate Team 4 IC, PLAUST, Nanjing Jiangsu 210007, China;

2. China Electronics Equipment System Engineering Corporation, Beijing 100141, China;

3. The Unit 91630 of PLA, Guangzhou Guangdong 510320, China;

4. Communication training base of PLA General Staff Headquarters, Zhangjiakou Hebei 075100, China)

**Abstract:** Cognitive radio is a combining creature of wireless communication and artificial intelligence. The essential difference of cognitive radio from traditional radio lies in its intelligence. The key of realization of cognitive radio is the successful application of artificial intelligence to radio. This paper first introduces the cognitive cycle which incorporates intelligence, and then simply describes the cognitive engine which is the core module to realize intelligence. Afterwards, it reviews several artificial intelligence techniques from the view of reasoning, learning and optimization. Finally, it introduces the application of artificial intelligence techniques to cognitive engines existing.

**Key words:** cognitive radio; artificial intelligence; cognitive engine; inference system; machine learning; intelligent optimization algorithm

### 0 引言

20 世纪以来, 随着无线业务呈几何级数的增长, 频谱短缺已成为制约无线电通信系统建设和发展的“瓶颈”。然而现有无线系统基于静态的频谱分配政策, 导致了宝贵频谱资源的严重浪费<sup>[1]</sup>。为了解决无线通信服务需求与频谱资源紧张之间的矛盾, 提高频谱利用率, 需要一种更智能的技术——认知无线电技术<sup>[2]</sup>(cognitive radio, CR)。

**基金项目:** 国家重点基础研究发展规划(“973”计划)项目(2009CB320403), 国家自然科学基金资助项目(60832008, 60832006), 国家科技重大专项课题(2009ZX03007-004)

**收稿日期:** 2010-12-23

**作者简介:** 刘怡静(1985-), 女, 在读研究生。主要研究方向: 认知无线电。

认知无线电的概念是由 Mitola 在 1999 年提出的<sup>[2]</sup>, 他的基本思想是通过依靠人工智能技术的支持, 使得认知无线电通过感知无线通信环境, 根据一定的学习和决策算法, 实时自适应地改变系统工作参数, 动态地检测和有效地利用空闲频谱, 在时间、频率以及空间上实现多维的频谱复用。具备智能是认知无线电的标志, 也是实现认知无线电的技术难点。人工智能技术(artificial intelligence, AI)的蓬勃发展使得认知无线电智能的实现成为可能。人工智能是一门包含广泛的学科, 它由不同的领域组成, 如知识表示、自动推理和搜索方法、机器学习和知识获取以及智能优化算法等。总的说来, 人工智能研究的一个主要目标是使机器能够胜任一些通常需要人类智能才能完成的复杂工作<sup>[3]</sup>。

## 1 认知循环与认知引擎

认知无线电从对环境的感知和分析到做出相应的智能决策和行动的认知过程可以用一个完整的OODA认知环路<sup>[4]</sup>来表示,如图1所示。

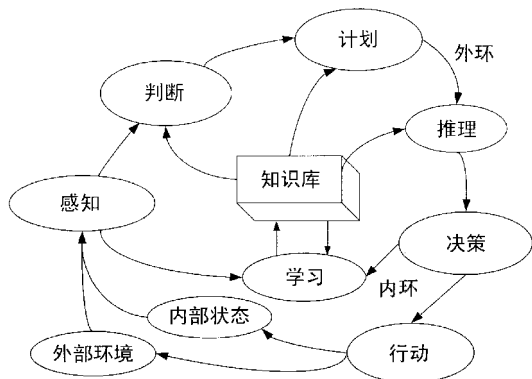


图1 认知环路

其中贯穿了2个过程:一个是决策环路(外环),另一个是学习环路(内环)。在外环中推理的效能对于做出正确的决策起到至关重要的作用,而学习则是实现知识积累、提高推理效能、连接内环和外环的关键,推理和学习是体现CR智能行为的2个主要特征。

认知引擎(cognitive engine,CE)就是在可重配置的无线电硬件平台基础上,实现基于人工智能技术的推理与学习,并做出优化决策的智能主体,是实现CR智能的核心功能模块。认知引擎要成为CR的智能主体需要具备3个基本功能:

观察:收集关于运行环境,无线电自身能力和特征的信息;

认知:理解环境和无线电的能力,能够做出相应的决策行动,并学习这些行动对无线电性能及网络性能的影响;

重配置:改变无线电的运行参数。

认知引擎的工作过程如下:根据外界无线环境、CR自身状态和用户需求等输入信息(观察),对情况进行分析,做出合适的反应(认知),最后将决策输出(重配置)。认知引擎的工作过程正是认知环路的一个循环过程,因而,可以说认知引擎是推动认知环路运行的源动力。虽然认知引擎的共同目标都是推动整个认知环路的循环反复,但应用不同的人工智能技术决定了各种CR系统中认知引擎的不同工作方式和功能。

## 2 CR中常用的人工智能技术

体现认知无线电智能的过程包括推理、学习和智能优化的过程。推理是根据知识库中已有的知识和当前计划进行决策的过程,而学习是一个长期的过程,包括对过去行为及执行结果的知识积累,学习使得知识库不断充实,以提高认知无线电未来推理的效能。优化能进一步提高参数配置的性能,以使得用户服务需求最大化。

### 2.1 推理系统

常用于认知无线电系统中的推理系统主要包括基于规则的推理和基于案例的推理。基于规则的推理在人工智能领域常被用来构建专家系统,而基于案例的推理除了推理,还包括学习的过程,2种推理系统各有其特点:

#### 2.1.1 基于规则的推理

基于规则的推理(rule-based reasoning,RBR)系统包括知识库和推理引擎2部分,首先领域专家将知识编写为规则存入知识库中,随后推理引擎根据输入和知识库中的规则进行推理,最后决定执行的动作。RBR系统执行简单,只要正确全面地将领域知识编为规则,无线电就可以根据输入快速地输出动作,但是其对规则的准确性和完备性要求较高,如果领域知识没有被很好地表达,就会得到错误的推理结果,并且当系统处理复杂问题时,规则之间容易发生冲突,影响系统正常运行。此外,当系统面对未知的新环境时缺乏学习的能力。因而,RBR在认知无线电中的应用受限。

#### 2.1.2 基于案例的推理

基于案例的推理(case-based reasoning,CBR)是根据已经掌握的一些问题的解决方法来获取相似的新问题的解决方法。CBR的特点在于它模仿人类的思维过程,当遇到新问题时能够根据以往的经验得出解决方法,并将新案例存入知识库,从而实现系统增量式的学习。应用CBR的认知无线电系统可以不断地学习和适应新环境,无需领域知识,认知无线电就能够具备自学习的能力。

在实际系统中,人们通常还会将RBR与CBR的方法结合起来使用,当知识库中的规则可以解决当前问题时,直接应用推理即可,当规则不足时,则通过案例学习丰富系统知识从而做出正确的推理决策。

## 2.2 机器学习方法<sup>[3]</sup>

机器学习是研究计算机怎样模拟或实现人类的学习行为,以获取新的知识或技能,重新组织已有的知识结构使之不断改善自身性能的一门学科,是人工智能中很重要的一个领域。下面介绍几种 CR 中常用的学习方法。

### 2.2.1 人工神经网络

人工神经网络 (artificial neural networks, ANN) 是受到人类大脑神经元的工作方式所启发,发展出的一种信息处理系统。人工神经网络具有自学习和自适应的能力,可以通过预先提供的一组输入输出数据,分析掌握二者之间潜在的规律,根据这些规律,用新的输入数据来推算输出结果。ANN 因其动态自适应性,可用来学习非线性系统的复杂模式及属性,已被用来解决认知无线电中频谱感知,信号分类以及自适应配置参数等问题。

### 2.2.2 强化学习

强化学习是用来解决能够感知环境的系统通过学习选择能够达到其目标的最优动作的问题。当系统在环境中做出每个动作后,通过设定相应的奖惩机制,使系统能够从这个非直接的回报中学习,以便后续动作产生最大的累积回报。强化学习可以在没有训练序列的情况下应用,其目标是使长期的在线性能最大化,因此它适用于认知无线网络的学习,如未授权用户通过用强化学习的方法探索可能的传输策略同时发掘相关知识,通过调整传输参数,达到限定条件下(如干扰温度受限)的目标(如最大化吞吐量)。

### 2.2.3 贝叶斯学习

贝叶斯学习利用样本信息的后验概率和参数的先验概率求总体,是一种直接利用概率实现学习和推理的方法。贝叶斯学习可以根据过去的经验提高未来的决策能力,在通信系统中可用于问题的抽取、收集和存储。

其他学习方法还包括决策树、模糊逻辑、博弈论和聚类等,在实际的认知无线电系统设计中,需要根据应用场景和目标的不同,选择不同的机器学习方法。

## 2.3 智能优化算法<sup>[3]</sup>

根据环境变化和用户需求智能调整无线电参数是认知无线电的基本功能,参数调整需满足信道条件、用户需求和制度限定等多方面的要求,因此,认

知无线电要能在多个目标函数间进行权衡,并给出一种符合多条件限制的折衷参数配置方案。智能优化算法模拟生物或自然界的现象,适用于 CR 的参数配置问题。下面简单介绍几种常用的智能优化算法。

### 2.3.1 遗传算法

遗传算法借鉴生物进化的原理,通过自然选择、遗传和变异等操作,模拟自然进化过程来寻找所求问题的答案。它在 CR 中的基本思想是把无线电类比为生物系统,将无线电的特征定义为一个染色体,染色体的每个基因对应电台一个可变的参量,通过遗传算法的进化得到满足用户服务质量要求的系统配置,但其有效性更多依赖于合适的参数选择。

### 2.3.2 模拟退火算法

这种算法模拟热力学中退火过程,通过模拟的降温过程按玻耳兹曼方程计算状态间的转移概率来引导搜索,以一定的概率选择邻域中目标值相对较小的状态,避免陷入局优,使算法具有很好的全局搜索能力。该算法执行容易,但收敛速率较慢。

### 2.3.3 禁忌搜索算法

这种方法的基本思想是在搜索过程中将近期的搜索过程存放在禁忌表中,阻止算法重复进入,禁忌表模拟人类的记忆功能,能够大大提高寻优过程的搜索效率。

其他优化算法还包括粒子群优化算法和蚁群优化算法等。智能优化算法不仅可以用来推理或通过目标函数寻找最优解,还可以通过训练样例来学习搜索空间中能够达到目标的一些规则。尽管各种算法有不同的特点,但共同的应用目的都是通过学习广泛的样例,形成对目标的解决方案。

## 3 人工智能技术的 CR 应用实例

Newman 等人研究的基于 CBR 的认知引擎<sup>[7]</sup>已经应用在 IEEE 802.22 的无线区域网 (WRAN) 中,这个 CE 的架构如图 2 所示。

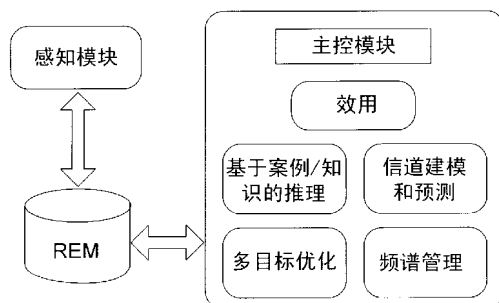


图 2 IEEE 802.22 的无线区域网认知引擎模型

## 工程实践及应用技术

其中,无线环境图(REM)是由分布的无线网络节点和网络设施具备的信息数据库,包括地理信息、服务和网络信息、政策信息、无线电设备的配置能力及过去的经验。REM中的信息通过不断观察CR节点的状态进行更新,并在CR网络中传播。REM通过提取无线环境的特征,为CE的工作做准备,该认知引擎结合了基于知识的学习和基于案例的学习方法,可以大大减少认知无线电的执行功率和自适应时间。

J. H. Reed 等人开发的认知无线电测试平台 CoRTekS 基于 ANN 技术<sup>[6]</sup>。无线电可以改变调制类型、传输功率、设置频率和带宽,同时最优化 3 个目标:用户服务质量、最大化吞吐量以及最小化传输功率。系统通过周期训练 ANN,并观察相应的结果,使 CE 逐渐学到了在某个场景下,无线电参数设置与系统性能间的映射关系,从而在给定的信道状态和用户需求下,CE 能够选择使目标函数最大的设置。

美国维吉尼亚工学院的无线通信中心的研究人员 Rieser 等人提出了一种基于遗传算法的认知引擎模型<sup>[5]</sup>:Bio-CR。其功能和执行流程如图 3 所示。

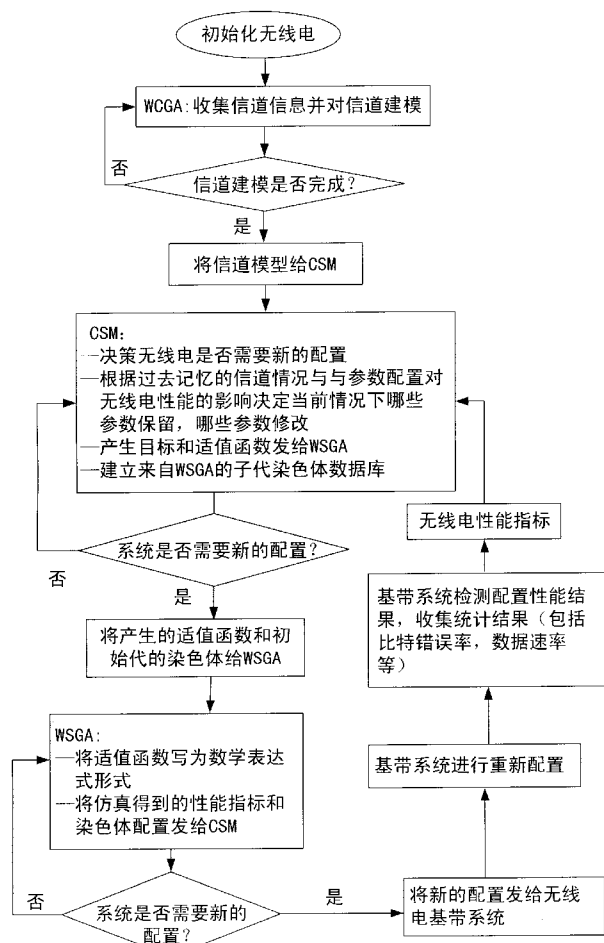


图3 Bio-CR的认知引擎工作流程

该模型包括无线系统遗传算法模块(WSGA),无线信道遗传算法模块(WCGA)和认知系统检测器模块(CSM),系统对当前环境下运行的无线电给出一种参数配置的方法,该配置可被修正多次,直到其真正满足目标需求。

## 4 结束语

人工智能技术是实现认知无线电的核心,该文回顾了一些在认知引擎设计中普遍应用的人工智能技术,并介绍了几种典型的应用不同人工智能技术的认知引擎。经验证明要设计出性能完备的认知引擎,往往需要将多种人工智能技术结合起来,选择什么样的人工智能技术取决于认知无线电的应用需求,需要设计者在系统的反应时间、执行的复杂程度、可提供的训练样例和系统鲁棒性等因素间进行权衡。随着人工智能技术的不断发展,认知引擎必将变得更加智能,认知无线电也会迎来更加广泛的应用前景。

## 参考文献

- [1] FCC. Spectrum Policy Task Force Report [R]. ET docket no. 02 - 155, Nov. 2002.
- [2] MITOLA J. Cognitive radio-making software radios more personal [D]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13 - 18.
- [3] 张仰森, 黄改娟. 人工智能教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [4] RONDEAU T W. Application of artificial Intelligence to wireless communications [D]. Blacksburg, VA, USA: Virginia Polytechnic institute and State University, 2007: 7 - 8.
- [5] RIESER C J. Biologically inspired cognitive radio engine model utilizing distributed genetic algorithms for secure and robust wireless communications and networking [D]. Blacksburg, VA, USA: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004: 42 - 45.
- [6] REED J H. Development of a cognitive engine and analysis of WRAN cognitive radio algorithms - phase I [R]. Wireless @ Virginia Tech, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, Final report submitted to ETRI, Dec. 2005: 1 - 12.
- [7] HE A, GAEDDERT J, BAE K, et al. Development of a case-based reasoning cognitive engine for IEEE 802. 22 WRAN applications [J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2009, 13(2): 37 - 48.