

国外信息科学与技术优秀图书系列 电子学与通信技术

认知无线电技术 (第2版)

Cognitive Radio Technology (Second Edition)

〔美〕Bruce A. Fette 等 著
赵知劲 郑仕链 尚俊娜 译



科学出版社

013064708

TN014
14-2

国外信息科学与技术优秀图书系列

认知无线电技术

(第2版)

Cognitive Radio Technology
(Second Edition)

[美] Bruce A. Fette 等 著
赵知劲 郑仕链 尚俊娜 译



科学出版社

北京



北航

C1672377

TN014

14-2

图字:01-2011-8198

内 容 简 介

本书是一部有关认知无线电(CR)技术的系统论著,全面涵盖了有关的概念、原理、体系结构、协议、标准、频谱政策和产品实现等内容。本修订版的16章介绍了认知无线电的基础知识,新增的8章具体介绍了认知无线电在多天线系统、政策语言、政策引擎、频谱感知与会合技术、频谱消费模型、自适应调整协议、认知网络、最新标准等方面的理论与应用。

本书侧重认知无线电领域的前沿研究,采用最新的参考资料,并对原理、实现细节、标准和政策等热点问题进行了综述,有助于读者把握认知无线电发展的脉络。本书可供电子信息工程、通信工程等领域的科研人员、管理人员以及高等院校的师生阅读、参考。

This edition of *Cognitive Radio Technology* by Bruce Fette is published by arrangement with ELSEVIER INC of 30 Corporate Drive, 4th Floor, Burlington, MA 01803, USA.

Copyright © 2009 by Elsevier Inc. All rights reserved.

本书英文版 *Cognitive Radio Technology*, 作者 Bruce Fette, 由 ELSEVIER INC 出版社出版, 地址 30 Corporate Drive, 4th Floor, Burlington, MA 01803, USA。

中译本《认知无线电技术(第2版)》由科学出版社出版, ISBN 为 978-7-03-037837-8。

图书在版编目(CIP)数据

认知无线电技术/(美)费特(Fette, B. A.)等著;赵知劲,郑仕链,尚俊娜译.—2版—北京:科学出版社,2013

(国外信息科学与技术优秀图书系列)

书名原文:Cognitive radio technology

ISBN 978-7-03-037837-8

I. ①认… II. ①费…②赵…③郑…④尚… III.
①无线电技术 IV. ①TN014

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 127533 号

责任编辑:张 濮 王晓丽 马晓晓 / 责任校对:赵桂芬

责任印制:张 倩 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年7月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2013年7月第一次印刷 印张:41 1/2

字数:930 000

定价:129.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

译 者 序

随着无线通信技术的发展与广泛应用,有限的频谱和低效固定的频谱分配使用政策导致了频谱资源的匮乏。认知无线电是一种智能频谱共享技术,使无线通信设备具有发现“频谱空穴”并合理利用的能力,它能真正地意识工作环境、调整工作条件、克服干扰、维持所需通信,是一项革命性的技术,它的实现会对通信产生革命性的推动作用。因此,了解关于认知无线电的概念、原理和应用等方面的知识已成为通信领域专业人员必不可少的知识需求。

认知无线电是一项正在不断发展的技术,Bruce A. Fette 博士和认知无线电领域的多位专家共同撰写了这本内容全面的书籍,更新了第 1 版的 16 章内容,并新增了 8 个章节的全新内容。本书综合了世界范围众多专家的最新研究成果,涵盖了认知无线电的概念、原理、体系结构、协议、标准、频谱政策和产品实现等诸多内容,重点强调了认知无线电实现的技术关键和未来发展趋势,并在每章最后给出了详细的参考资料,为读者提供了广泛的阅读参考空间。因此,我们特将此书翻译成中文介绍给广大读者,希望能够促进我国认知无线电技术的研究、发展和应用。

本书的翻译工作主要由赵知劲、郑仕链和尚俊娜完成,赵治栋、徐春云、王洵、骆振兴等同志参加了部分译校工作。杨小牛等多位学者对《认知无线电技术》第 1 版的翻译提出了很多具有建设性的意见和建议,在此表示感谢!科学出版社的各级领导和编辑为本书的出版付出了辛勤的劳动,借此机会表示我们诚挚的谢意。由于本书篇幅较长、内容涉及面广,加之时间仓促、译者水平有限,疏漏和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

译 者

2013 年 5 月

前言

本前言^①纵观理想认知无线电 (iCR) 的各个方面。理想 CR 将 CR 技术与先进的软件定义无线电 (SDR) 相结合, 从而实现通过学习来帮助用户使用计算机视觉、高性能语音理解、全球定位系统导航、先进的自适应组网、自适应物理层无线电波形和大量机器学习过程的无线电。

1. CR 了解无线电就像 TellMe 了解 800 号码一样

当你拨打 1-800-555-1212 时, 语音合成算法就会答复: “TellMe 免费号码服务。请问有什么可以帮您?” 如果你含糊地答复, 它就会回复: “确认, 美国联合航空公司 (United Airlines)。如果不是您所需要的请按 9, 否则马上为您查找号码, 请等待。” 据报告, TellMe 可以实现 99% 的准确率, 取代了以前成千上万的话务员。作为一个语言理解系统, TellMe 获得了很大的成功, 它仅集中于一项任务: 找到一个免费的电话号码。狭窄的任务集中度是算法成功的关键。

认知无线电体系结构 (CRA) 是构建认知无线网络 (CWN) 的模块。CWN 是 TellMe 的无线电移动产物。CR 和认知网络作为计算机智能技术的实用、实时、高集中度的应用而不断涌现。CR 与更一般的人工智能服务 (AI) (如智能代理、计算机语音和计算机视觉) 的区别在于集中程度。和 TellMe 一样, 理想认知无线电也集中于狭窄的任务。iCR 调整无线电承担的信息服务以满足特定用户的特定需求。TellMe 是一项网络业务, 它要求有足够的网络计算资源同时服务成千上万的用户。而 CWN 则可以从一个放在钱包中或扣在皮带上的无线电——蜂窝电话开始发展, 这些无线电集中了从大量可用无线电信息网络和资源中提取出单个用户需要的信息的狭窄的任务。每个 CR 通过 CRA, 使用其音频、视频感知和自动机器学习的功能, 为单个用户提供服务、保护私人信息。

TellMe 现在已经投入使用, 而 iCR 还在全球无线研究中心和软件定义无线电 (SDR) 论坛、世界无线研究论坛 (WWRF) 等产业论坛中迅速发展。本书介绍从 SDR 发展到动态频谱接入 (DSA) 再到 iCR 系统的技术, 讨论技术挑战和相应的应对方法, 强调 DSA 和 iCR 是一项促进快速涌现的商用 CWN 业务的技术。

2. 未来的 iCR 见你所见, 知道射频使用、需求和偏好信息

尽管普通的蜂窝电话也具有照相机, 但是它缺少视觉算法, 因此它并不知道它所观

^① 由 *Cognitive Radio Architecture: The Engineering Foundations of Ratio XML* (J. Mitola III, Wiley, 2006) 改编而成。

察到的是什麼。它可以传送视频片段,但是并不能理解视频片段中的视觉场景。如果有视觉处理算法,那么蜂窝电话可以感觉和分类视觉场景,找出更有效的无线电行为。通过视觉处理算法,它能够辨别是在家中、在车里、在工作的地方、在购物场所还是在回家的公路上。如果算法结果说明用户驾车已快到家,则 iCR 知道以无线方式为用户打开车库门。这样,用户就不需要使用另一个打开车库门的无线器件。实际上,一旦 CR 进入市场,就不再需要车库开门器了,也不需要密钥卡打开车门了。当用户走近汽车时,其 iCR 就能感知到这种场景,经过训练后,它就能合成密钥卡射频传输,为用户打开车门。

CR 并不会尝试所有情况。利用无线电、普通用户和(行为政策语言表达的)无线电合法使用信息方面的先验知识,CR 会对无线电的使用模式进行学习。这种 iCR 检测频谱机会帮助用户使用无线电频谱,进行准确的传送,并以最小化的干扰提供帮助。

如今,实现视觉感知功能的产品已经在笔记本电脑中得到展示。强化学习(RL)和案例推理(CBR)已经是无线网络中应用的成熟技术,学术界和工业界的研究表明这些应用是 iCR^①和 CWN^②的技术开拓者。2~3 个摩尔定律周期或者 3~5 年后,这些视觉算法和学习算法将会集成到蜂窝电话中。在过渡阶段,CWN 将会开始提供这种业务,向消费者展示隐私和超个性化便利之间新的折中。

3. CR 听你所听,增强个人技能

现在用户携带的蜂窝电话是“聋”的。尽管它上面安装有麦克风,但是缺少嵌入的语音理解技术,所以它不能理解所听到的内容。例如,它可以让你和你的女儿通话,但是不知道对方是你的女儿,也不知道你们的谈话内容。如果它具有语音理解技术,则可以感知语音对话,可以检测到你和你的女儿正在谈论的一些普通话题,如你最喜欢的歌曲等。通过 iCR,语音算法能够检测到你的女儿通过蜂窝电话告诉你的你最喜欢的歌曲在 WDUV 上播放。作为 SDR,不仅是部蜂窝电话,你的 iCR 决定你的女儿和你都在 WDUV 的广播频段上,调频到 FM105.5,让你可以听到“The Rose”。有了 iCR,人们就不再需要在口袋、钱包或背包里面放置晶体管无线电了。事实上,当高端 CR 进入市场以后,你可能不再需要 MP3 播放器、电子游戏机和类似的产品了(CR 可能将与 MP3 等结合成为一个统一体)。如今,个人电子产品的价值定位在于使其产品的最优化,而 iCR 的价值定位在于其服务的集中度,简化、合理化用户的日常生活。iCR 能够了解用户的无线电信息使用模式、歌曲访问、游戏下载,以及用户希望的广播新闻、运动和股票报价剪辑等,通过重编程其内部 SDR 来更好地满足用户需求和偏好。将视觉和语音感知相结合,当用户走近其汽车时,iCR 可以感知到这种场景,并且将汽车上的收音机调频至昨天早上用户收听的 WTOP,收听用户最喜欢的“Traffic and weather together on the

① Mitola III. Cognitive Radio Architecture. 2006.

② Katz M, Fitzek S. Cooperation in Wireless Network. Elsevier, 2007.

eights” 节目。

对于有效的机器学习, iCR 保存了无线电和用户可能需要回想的语音、RF 以及视觉提示, 扮演了信息假肢的角色, 扩展了用户记忆对话和场景片段细节的能力, 增强了 $\langle \text{Owner}/\rangle^{\text{①}}$ 的技能。由于语音和视觉技术的脆弱性, CR 不得不像连续运行的摄像机一样尝试“记住所有东西”。因为 CR 可以检测内容(如说话人姓名以及“无线电”、“歌曲”等关键词), 所以它可以找到用户询问的内容, 从而扩大用户对场景的记忆。因此, CR 能增强用户的个人技能(如细节记忆能力等)。

4. iCR 学习区分说话人, 减少混淆

为进一步限制语音的组合式爆破, CR 会构建说话人模型——摘录统计说话人模型, 特别是对 $\langle \text{Owner}/\rangle$ 更是如此。当 $\langle \text{Owner}/\rangle$ 把 iCR 作为蜂窝电话进行呼叫时, 说话人建模特别可靠。当前的说话人识别算法区分男性和女性说话人的准确性很高。当只需要识别少量不同的说话人(少于 10 人)并且具有可靠的辅助信息(如说话人的电话号码)时, 当前最先进的算法能够以高于 95% 的准确度识别个体说话人。

每个 iCR 会不断地对其 $\langle \text{Owner}/\rangle$ 的语音模式进行学习, 以防止与其他说话人混淆。这样, iCR 不断增加经验以实现不断复杂的对话。如今, 3GHz 笔记本电脑能够实时支持这种程度的语音理解和对话合成, 3~5 年内将在蜂窝电话上得到应用。

CR 必须充分了解无线电以及用户 $\langle \text{Owner}/\rangle$, 录制并分析个人信息, 同私人信息的相关结合将促进可信任隐私技术的发展。因此, CRA 集成 $\langle \text{Owner}/\rangle$ 说话人识别, 如生物密码学结构中软生物的一种一样, 可以比密码保护提供更高的安全系数和便利性来保护 $\langle \text{Owner}/\rangle$ 的私人信息。

5. 更为灵活的无线电频谱二级使用

2008 年, 美国联邦通信委员会(FCC)发布了第二个报告条例, 其中规定 CR 可以以二次用户的形式在满足低功率设备第 15 条规则的条件下, 如建立 ad hoc 网络, 使用分配给 TV 的但未被广播市场(如从模拟向数字 TV 过渡)使用的无线电频谱。SDR 论坛成员公司已经演示了具有这些初步频谱感知和使用功能的 CR 产品。军用和商用无线产品已经实现了 FCC 的这项规定。

DSA CR 发展成为情景意识 iCR 所需的视觉和语音感知功能已不遥远。产品正处于开

① 语义 Web: 研究人员认为 CR 具有足够的语音功能回答 $\langle \text{Self}/\rangle$ 以及 $\langle \text{Self}/\rangle$ 对 $\langle \text{Radio}/\rangle$ 的使用的问题以帮助其 $\langle \text{Owner}/\rangle$ 。当一个像“所有者”这样的普通概念转换成可理解的计算机基元的本体结构时(如通过语义 Web 技术), 这个概念就成了用于自动推理和信息交换的计算基元。无线电 XML 是可扩展标记语言(XML)的 CR 派生物, 它可以用来标准化这些无线电场感知基元。通过 $\langle \text{Angle-brackets}/\rangle$ 的这种简单处理, 这些基元得到了强化。所有 CR 都有一个 $\langle \text{Self}/\rangle$ 、一个 $\langle \text{Name}/\rangle$ 和一个 $\langle \text{Owner}/\rangle$ 。 $\langle \text{Self}/\rangle$ 具有如 $\langle \text{GSM}/\rangle$ 和 $\langle \text{SDR}/\rangle$ 一样的功能, 它是一种自推断的计算机体系结构, 只有在计算功能局限于实时响应的任务时, 才不对系统崩溃提供保证。这对于 CR 是合适的, 但是对于通用计算机, 局限太大。

发中。因此,本书很多章节都强调了CR的频谱捷变性,表明了增强型感知技术的发展路径,为无线产业提出了新的长期发展方向。希望本书能够帮助读者理解CR技术,并为CR技术创造新的机会。

Joseph Mitola III 博士

目 录

译者序

前言

第 1 章 认知无线电技术的历史和背景	1
1.1 认知无线电前景	1
1.2 认知无线电产生的历史和背景	1
1.3 软件定义无线电简要历史	3
1.4 基本 SDR	6
1.4.1 SDR 硬件体系结构	6
1.4.2 SDR 中计算处理资源	8
1.4.3 SDR 软件体系结构	10
1.5 认知无线电	11
1.5.1 认知无线电中的 Java 反射	11
1.5.2 认知无线电中的智能天线	12
1.5.3 政策引擎	12
1.6 频谱管理	13
1.6.1 非授权频谱管理	14
1.6.2 噪声叠加	15
1.6.3 聚集频谱需求和使用转租方法	16
1.6.4 优先接入	16
1.7 美国政府在认知无线电发展中的作用	17
1.7.1 DARPA	17
1.7.2 FCC	17
1.7.3 NSF/CSTB 研究	17
1.8 智能程度	18
1.9 本书组织结构	19
参考文献	21
第 2 章 通信政策和频谱管理	22
2.1 引言	22
2.2 推动认知无线电发展的技术	22
2.3 频谱接入新机会	25
2.3.1 当前频谱接入技术	25
2.3.2 机会式频谱接入	29

2.3.3 动态频率选择	31
2.4 认知无线电的政策挑战	31
2.4.1 动态频谱接入	32
2.4.2 安全性	34
2.4.3 认知无线电之前的通信政策	35
2.4.4 认知无线电对通信政策的影响	35
2.4.5 美国通信政策始于泰坦尼克号	36
2.4.6 美国通信政策: 与技术同步	37
2.5 通信政策和技术对监管制度的影响	38
2.5.1 基本几何结构	38
2.5.2 动态政策介绍	40
2.5.3 政策驱动的设备介绍	41
2.5.4 干扰避免	42
2.5.5 综合影响	42
2.6 认知无线电全球政策	43
2.6.1 全球兴趣	43
2.6.2 美国对认知无线电实现动态频谱接入的看法	45
2.7 小结	48
习题	49
参考文献	49
第3章 认知无线电平台: 软件定义无线电	51
3.1 引言	51
3.2 硬件体系结构	52
3.2.1 框图	53
3.2.2 基带处理器引擎	57
3.2.3 基带处理配置	59
3.2.4 多核系统和片上系统	61
3.3 软件体系结构	61
3.4 SDR 开发和设计	64
3.4.1 GNURadio	64
3.4.2 软件通信体系结构	64
3.5 应用	73
3.6 开发	75
3.6.1 组件开发	75
3.6.2 波形开发	76
3.7 认知波形开发	77
3.8 小结	78

参考文献	79
第4章 认知无线电所需技术	80
4.1 引言	80
4.2 无线电灵活性及无线电功能	80
4.2.1 无线电灵活性和无线电功能的持续发展	81
4.2.2 软件可支持无线电举例	82
4.2.3 软件可编程无线电举例	83
4.2.4 SDR 举例	84
4.3 意识无线电、自适应无线电和认知无线电	85
4.3.1 意识无线电	85
4.3.2 自适应无线电	85
4.3.3 认知无线电	86
4.4 无线电功能和特点的比较	87
4.5 认知无线电可用技术	87
4.5.1 地理定位	88
4.5.2 频谱感知/频率占用	88
4.5.3 生物测定	88
4.5.4 时间	89
4.5.5 空间意识或情景意识	90
4.5.6 软件技术	90
4.5.7 频谱意识及租借潜力	94
4.6 对认知无线电的资助和研究	95
4.6.1 认知地理定位应用	95
4.6.2 动态频谱接入和频谱意识	97
4.6.3 会合问题	100
4.6.4 认知无线电认证应用	101
4.7 认知无线电发展历程	102
4.7.1 决策、方向 and 标准	103
4.7.2 新产品生产	103
4.8 CR 相关技术的更新	103
4.8.1 传感器和基础设施	103
4.8.2 PHY、MAC 和网络层	104
4.8.3 推理器	104
4.8.4 政策	105
4.8.5 硬件和演示	105
4.9 小结	106
习题	107

参考文献	107
第5章 频谱意识与频谱接入研究	109
5.1 动态频谱意识和频谱接入的目标	109
5.2 频谱意识和接入的先期工作	109
5.3 端到端的 DSA 实现例子	111
5.4 动态频谱意识	112
5.4.1 频谱环境特征化总结	112
5.4.2 信号带宽频谱环境特征化	113
5.4.3 前端能量分布和前端非线性的重要性	116
5.5 前端线性管理	122
5.5.1 实验数据的前端线性表示	124
5.5.2 前端线性管理算法和方法	127
5.5.3 前端线性管理的优势	130
5.6 动态频谱接入目标	133
5.6.1 抗干扰工作	136
5.6.2 抗干扰 DSA	139
5.7 频谱覆盖管理目标	140
5.8 网络级决策	142
5.8.1 DSA 驱动的动态带宽拓扑	143
5.8.2 DSA 驱动的动态拓扑和网络组织	143
5.9 小结	144
习题	145
参考文献	145
第6章 认知政策引擎	148
6.1 无线电政策管理展望	148
6.2 背景和定义	148
6.3 频谱政策	149
6.3.1 频谱政策管理	150
6.3.2 频谱政策管理的系统要求	150
6.4 认知政策管理先例	151
6.4.1 DARPA 的政策管理计划	151
6.4.2 政策管理的学术研究	152
6.4.3 政策管理的商业应用	153
6.4.4 政策管理的标准化工作	154
6.5 无线电政策引擎体系结构	156
6.5.1 政策引擎工作概念	156
6.5.2 政策管理的技术方法	157

6.5.3 驱动技术	159
6.6 政策引擎与认知无线电的集成	160
6.6.1 软件通信体系结构集成	160
6.6.2 政策引擎设计	161
6.6.3 无线电与网络政策管理体系结构的集成	163
6.7 认知政策管理的未来	164
6.7.1 认知政策管理的军事机会	165
6.7.2 频谱管理的商业机会	166
6.7.3 采用政策管理体系结构的障碍	166
6.8 小结	167
参考文献	167
第7章 物理层和链路层认知技术	170
7.1 引言	170
7.2 当前信道条件下物理层和链路层的多目标优化	170
7.3 认知无线电的定义	171
7.4 建立无线电控制和性能测量	172
7.4.1 物理层和链路层参数	173
7.4.2 将结果建模为主要目标	175
7.5 MODM 理论及其在认知无线电中的应用	177
7.5.1 MODM 定义及其基本表示	178
7.5.2 约束建模	178
7.5.3 Pareto 最优化前沿: 找到不受支配解	178
7.5.4 无线电环境是一个 MODM 问题	179
7.5.5 MODM 求解的 GA 方法	180
7.6 用于认知无线电的多目标遗传算法	184
7.6.1 认知环	184
7.6.2 将无线电参数表示成染色体基因	187
7.6.3 染色体的多维分析	188
7.6.4 相对聚池锦标赛选择	190
7.6.5 WSGA 举例	190
7.7 高级遗传算法技术	193
7.7.1 种群初始化	193
7.7.2 以先前观测到的解启动 GA	194
7.7.3 GA 的 CBDT 初始化	194
7.8 高层智能需求	196
7.8.1 自主调整参数来实现目标	196
7.8.2 奖励好的行为以及惩罚差的行为	196

7.9 智能计算机的工作方式	198
7.9.1 感知和环境意识	198
7.9.2 决策和优化	199
7.9.3 案例学习	199
7.9.4 权重和目标函数	199
7.9.5 分布式学习	199
7.10 小结	200
参考文献	201
第8章 认知技术：位置意识	204
8.1 引言	204
8.2 无线电地理定位和时间业务	204
8.2.1 全球定位系统	205
8.2.2 坐标系变换	207
8.3 网络定位	208
8.3.1 空间变化网络业务可用性	208
8.3.2 地理定位驱动的路由	209
8.3.3 各种功能	210
8.4 地理定位的其他方法	210
8.4.1 基于时间的方法	210
8.4.2 到达角方法	214
8.4.3 接收信号强度方法	215
8.5 基于网络的方法	216
8.6 边界判决	216
8.6.1 监管区域选择	216
8.6.2 政策服务器及区域	219
8.6.3 边界判决的其他用处	219
8.7 蜂窝电话 911 为急救人员提供地理定位举例	219
8.8 与其他认知技术的接口	220
8.8.1 政策引擎接口	220
8.8.2 组网功能接口	220
8.8.3 计划引擎接口	221
8.8.4 用户接口	221
8.9 小结	221
习题	222
参考文献	222
第9章 认知技术：三种网络意识	223
9.1 引言	223

9.2 应用及其要求	223
9.3 网络意识：协议	225
9.3.1 动态协议组成	225
9.3.2 动态协议组成的特征交互	226
9.3.3 认知控制	227
9.4 边缘网络技术情景意识协议	228
9.5 网络意识：节点功能和协作	229
9.6 无线电分布式系统：无线电小组	230
9.6.1 维护一条协作信道	231
9.6.2 小组内分布式工作	231
9.6.3 分布式学习环境	231
9.7 网络意识：用于自布局的节点位置和认知	232
9.8 小结	233
习题	233
参考文献	233
第 10 章 用户认知业务	236
10.1 引言	236
10.2 语音和语言处理	237
10.2.1 说话人识别	237
10.2.2 语言辨认	243
10.2.3 文语转换	243
10.2.4 语文转换	244
10.2.5 机器翻译	245
10.2.6 背景噪声抑制	245
10.2.7 语音编码	246
10.2.8 说话人变异音特征化	247
10.2.9 噪声特征化	247
10.3 门房业务	248
10.4 小结	249
参考文献	250
第 11 章 网络支持：无线电环境地图	252
11.1 引言	252
11.2 REM：提供 CR 网络支持的工具	253
11.2.1 内部和外部网络支持	253
11.2.2 REM 介绍	254
11.2.3 REM 在认知环中的作用	255
11.3 利用 REM 获得认知能力：一种系统综合的方法	255

11.3.1	意识：认知无线电的先决条件	256
11.3.2	意识分类	257
11.3.3	通过 REM 获得 SA：一种综合的、有成本效益的方法	259
11.3.4	REM 驱动的认知引擎的结构	261
11.4	REM 高层系统设计	262
11.4.1	REM 分类	262
11.4.2	REM 数据库设计指南	262
11.4.3	实现 REM 的技术	266
11.4.4	REM 的支撑元素	267
11.4.5	REM 和认知引擎之间的 API	270
11.4.6	REM 分发方案和负荷分析	271
11.5	网络支持场景和应用	273
11.5.1	基于基础设施的网络和中心式全局 REM	273
11.5.2	Ad hoc 网络和分布式本地 REM	274
11.6	REM 在认知无线网络中的应用举例	276
11.6.1	REM 应用于 802.22WRAN	276
11.6.2	REM 应用于 ad hoc 频谱共享网络	279
11.7	小结与待研究问题	281
	习题	282
	参考文献	283
第 12 章	认知研究：知识表示与学习	286
12.1	引言	286
12.2	知识表示和推理	289
12.2.1	符号表示	290
12.2.2	本体论和框架系统	292
12.2.3	行为表示	293
12.2.4	案例推理	293
12.2.5	规则系统	295
12.2.6	时间知识	296
12.2.7	知识表示小结	297
12.3	机器学习	298
12.3.1	记忆	298
12.3.2	分类器	299
12.3.3	贝叶斯逻辑	300
12.3.4	决策树	300
12.3.5	强化学习	301
12.3.6	时间差分法	303

12.3.7	神经网络	304
12.3.8	遗传算法	305
12.3.9	仿真与博弈	306
12.4	实现考虑	306
12.4.1	计算要求	306
12.4.2	脆弱性和边界条件	306
12.4.3	可预测行为	306
12.5	小结	307
	习题	309
	参考文献	309
第 13 章	本体论在认知无线电中的作用	311
13.1	基于本体论的无线电概述	311
13.2	认知无线电的知识密集性	311
13.2.1	约束和要求知识	312
13.2.2	信息收集和融合	313
13.2.3	情景意识和建议	313
13.2.4	自意识	313
13.2.5	用户、自身或者其他无线电的查询	314
13.2.6	查询响应和命令执行	314
13.2.7	资源协商	314
13.2.8	协议栈各个层的动态互用性	314
13.3	本体论及其在认知无线电中的作用	315
13.3.1	基础	315
13.3.2	本体语言	316
13.3.3	查询	317
13.3.4	推理	318
13.3.5	本体论在知识密集应用中的作用	319
13.4	分层本体和参考模型	319
13.4.1	物理层本体	319
13.4.2	数据链路层本体	321
13.5	例子	325
13.5.1	对时延或误差的响应	325
13.5.2	训练序列长度调整	326
13.5.3	数据链路层协议一致性和选择	328
13.6	待解决研究问题	328
13.6.1	本体开发和统一	329
13.6.2	本体映射	329