



认知无线网络 理论与关键技术

Cognitive Wireless Network
Theory and Key Technology

冯志勇 张平 郎保真 张奇勋 编著

● 国家“973”项目“认知无线网络理论与关键技术研究”的研究成果总结。

● 内容深入实用，具有很高的学术科研参考价值。

● 取材新颖，具有前瞻性，对读者理解认知无线网络有重要参考价值。



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



认知无线网络 理论与关键技术

Cognitive Wireless Network
Theory and Key Technology

人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (C I P) 数据

认知无线网络理论与关键技术 / 冯志勇等编著. --
北京: 人民邮电出版社, 2011.1
(4G丛书)
ISBN 978-7-115-24246-4

I. ①认… II. ①冯… III. ①无线电通信—通信网
IV. ①TN92

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第210719号

内 容 提 要

本书主要介绍了认知无线网络的基础理论、关键技术以及相关的标准化进展,共分9章。第1章主要介绍了认知无线网络的定义及概述;第2章重点介绍了目前学术界和工业界已经提出的一些适用于认知无线网络的网络体系架构;第3章介绍了认知无线网络的认知技术;第4章介绍了认知无线网络中的学习;第5章重点介绍了动态频谱管理方法和联合的无线资源管理;第6章介绍了课题组的又一个创新性研究方向:Self-x 算法流程;第7章内容提供了认知无线网络跨层优化的概述;第8章介绍了认知无线网络性能评估的重要指标;第9章提供了CR 技术在各个标准化组织的研究进展。

本书反映了目前认知无线网络领域的最新研究成果,跟踪了国内外认知无线网络研究的动向,是全面、深入了解认知无线网络的极有价值的参考书。书中绝大部分内容取材于作者最新的研究成果和发展动向,具有一定的前瞻性和学术参考价值。本书既可供通信、电子、信息等专业的相关科研人员、研究生和大学高年级学生作为参考书,也可供信息网络技术研究开发人员、网络运营商的工程技术人员参考。

4G 丛书

认知无线网络理论与关键技术

-
- ◆ 编 著 冯志勇 张 平 郎保真 张奇勋
责任编辑 姚予疆
执行编辑 刘 洋
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京艺辉印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 14.75
字数: 359千字
印数: 1—3 000册
 - 2011年1月第1版
2011年1月北京第1次印刷

ISBN 978-7-115-24246-4

定价: 49.00 元

读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

广告经营许可证: 京崇工商广字第0021号

前 言

未来的无线移动通信网络，将是一个多种运营商、多种无线接入技术共存的异构网络，这个网络提供更加丰富的业务类型，同时需要利用宽带化技术来满足用户不断增长的高速数据需求。如何提升频谱利用率来满足用户带宽需求，并且如何协同异构的网络来满足各种业务的需求，给用户带来更好的体验将是未来网络面临的重大挑战。

认知无线网络是在认知无线电技术基础上形成的网络形态，是当今通信技术的前沿研究领域之一。认知无线网络具有高度的智能性，能够感知当前网络的环境信息并且能够分辨当前的网络状态，然后依据这些状态进行相应的规划决策和响应。通过引入智能性，认知无线网络能够更好地实现端到端通信目标的优化，并提高网络资源的使用效率。

认知无线网络研究的主要问题及关键技术包括以下几个方面：认知无线网络中的信息获取，包括对频谱感知，感知导频信道和认知数据库等的研究；认知无线网络学习机制，包括机器学习的广泛应用，学习方法应该考虑的问题及方法的演进；认知无线网络的动态频谱管理和联合无线资源管理；网络的各项自主管理功能，包括自配置、自优化、自愈合等；认知无线网络的跨层联合优化以及认知无线网络性能的评估指标等。与认知无线电技术相比，认知无线网络的网络结构发生了根本性的变化，增添了很多新的功能和新的元素。

为了实现上述的变化，认知无线网络应该具备以下主要特征：网络间的协同功能，对环境的感知能力；对环境变化的学习能力及对环境变化的自适应性；通信质量的高可靠性；对网络资源尤其是频谱资源的动态管理以及系统功能模块和协议的可重构性等。尽管认知无线网络的研究工作刚刚起步，但已经彰显无限的潜力，其高度的智能性将对未来的信息通信发展产生不可估量的影响，甚至会改变我们生活的方方面面，提高我们的生活质量。所以对于认知无线网络已成为全球范围内新一代信息通信网络领域具有重要意义的核心方向之一。认知无线网络具有高智能性及灵活性；从构成网络的终端、无线接入等到网络的协议、软硬件体系结构多方面都要具有自主、自管理、自配置、自优化等功能。因此，认知网络真正意义上的工程化应用，仍然有相当长的道路要走。

针对认知无线网络的标准化问题，多个国家的大学和研究机构、信息通信设备制造商和网络运营商以及国际标准化组织如 ITU、ETSI、IEEE、3GPP 等都纷纷投入大量资源对这一领域进行研究，已经取得许多令人鼓舞的重要研究成果。2004 年，软件无线电论坛成立了认知无线电工作组与认知无线电特殊兴趣组，专门开展有关认知无线电技术的研究，对认知无

线电的定义、可用技术、模型架构及认知数据库等信息交互机制做出了贡献。与国外的研究几乎处于同步,国内近年来也开始了有关认知无线网络理论、关键技术以及标准化方面的研究,也获得了相应的研究成果。

本书主要介绍认知无线网络的基础理论、关键技术以及相关的标准化进展,共分9章。第1章主要介绍了认知无线网络的定义及概述,重点对认知循环,认知无线网络实现的3个阶段进行描述;第2章重点介绍了目前学术界和工业界已经提出的一些适用于认知无线网络的网络体系架构,对架构的原理、功能实体及相关的运行机制进行了详细描述。在认知网络中引入了端到端效率,并对体系架构提出了进一步的要求;第3章介绍了认知无线网络的认知技术,包括频谱检测技术、频谱感知方法、感知导频信道,以及认知数据库。对其各自的模型、原理、目前基本的研究方法及研究过程中的困难与挑战等进行了详细描述;第4章介绍了认知无线网络中的学习,包括机器学习的问题描述,认知网络的任务以及认知网络学习所面临的问题;第5章重点介绍了动态频谱管理的方法和联合的无线资源管理,其中,动态频谱管理针对不同体系架构下的不同场景对频谱管理的方法进行了分类,并介绍了相关的执行机制;联合无线资源管理则全面详细地介绍了接纳控制、负载均衡的流程机制及目前的一些有效的算法。本章还针对各种算法的仿真结果进行对比和分析;第6章介绍了课题组的又一个创新研究方向:Self-x 算法流程,该章对相关算法进行概述并描述相应的应用场景,举例说明算法的应用,同时对各个算法进行评估。此外,本章还提供了Self-x的标准化研究工作的介绍;第7章提供了认知无线网络跨层优化的概述,在此基础上对跨层技术依托的架构和实现、跨层设计的方法、跨层反馈机制、跨层设计的应用以及基于模型的跨层方法进行详细描述;第8章介绍了认知无线网络性能评估的重要指标,包括网络性能、服务性能和算法性能的评估;第9章提供了认知无线技术在各个标准化组织的研究进展,包括ITU、IEEE、ETSI以及软件无线电论坛等其他组织的相关研究活动。

本书反映了目前认知无线网络领域的最新研究,跟踪了国内外认知无线网络研究的动向,是全面深入了解认知无线网络的极有价值的参考书。书中绝大部分内容取材于作者最新的研究成果和发展动向,具有一定的前瞻性和学术参考价值,适合作为网络和通信领域的教学、科研工作和工程应用的参考书。既可以供通信、电子、信息等专业的相关科研人员、研究生和大学高年级学生作为参考书,也可以供信息网络研究开发人员、网络运营商的网络工程技术人员参考。

本书主要由张平教授、冯志勇教授、郎保真教授和张奇勋博士撰写。在本书撰写过程中,北京邮电大学无线新技术研究所的刘宝玲教授和泛在网络研究室的科研人员、研究生为本书的编写提供了大力的协助,在此特别感谢姚艳军、何春、谭力、陈亚迷、尹鹏、张第、王莹等人做的工作。

本书作者的研究工作得到国家重点基础研究发展计划(“973”项目)(2009CB320400)、国家自然科学基金重点项目(60632030)、国家自然科学基金重点项目(60832009)、国家高技术研究发展计划(“863”计划)(2009AA011802)、国家科技重大专项(2009ZX03007-004、2010ZX03003-001)、国家无线电管理局研究项目和欧盟FP7 端到端效率(FP7-ICT-2007-216248)等国内、国际项目的连续资助,在此表示深深的谢意!

由于认知无线网络的研究仍处于不断深入之中,加之作者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请专家、读者指正。

目 录

第 1 章 认知无线网络	1
1.1 认知无线电和认知网络概述	1
1.1.1 认知无线电	1
1.1.2 认知网络	1
1.2 认知无线电	2
1.2.1 认知无线电定义	2
1.2.2 认知循环	3
1.3 认知网络	3
1.4 认知无线网络	4
1.4.1 认知阶段	4
1.4.2 学习阶段	5
1.4.3 决策和调整阶段	5
参考文献	6
第 2 章 认知无线网络体系架构	7
2.1 认知无线网络的体系架构概述	7
2.2 IEEE 1900.4 架构和功能介绍	11
2.2.1 1900.4 工作组考虑的系统场景以及一些假设	11
2.2.2 1900.4 工作组定义的架构、功能模块以及模块之间的接口	12
2.2.3 1900.4 工作组的 3 种应用场景	14
2.2.4 P1900.4.1	15
2.2.5 P1900.4a	16

2.2.6 P1900.6	16
2.3 E3 功能和系统架构需求	18
2.3.1 框架定义	18
2.3.2 JRRM、ASM、DNPM 的功能架构	18
2.3.3 具备自处理功能的认知合作无线资源管理及网络管理功能架构	20
2.3.4 端到端效率对系统架构的需求	22
参考文献	25

第 3 章 基于认知的信息获取技术	26
3.1 频谱感知	26
3.1.1 频谱感知的性能指标	26
3.1.2 感知方法	27
3.1.3 频谱检测的挑战	28
3.2 认知导频信道 (CPC)	29
3.2.1 CPC 操作流程	29
3.2.2 CPC 实现举例	30
3.2.3 CPC 的主要功能	33
3.3 数据库	33
3.3.1 多域认知数据库	33
3.3.2 数据库接入	35
参考文献	37

第 4 章 认知无线网络中的学习.....38

4.1 概述..... 38

4.2 机器学习中的问题描述..... 39

4.2.1 分类和回归的学习..... 39

4.2.2 行为和决策的学习..... 40

4.2.3 学习的具体说明和理解..... 42

4.2.4 问题描述的总结..... 43

4.3 认知网络的任务..... 44

4.3.1 不规则检测和默认诊断..... 44

4.3.2 对入侵的反应..... 45

4.3.3 网络配置和优化..... 47

4.4 公开问题和研究挑战..... 49

4.4.1 从监督到自主的学习..... 49

4.4.2 从离线到在线的学习..... 49

4.4.3 从固定到变化的环境..... 50

4.4.4 从集中到分布式的学习..... 50

4.4.5 从设计到构建的描述..... 50

4.4.6 从知识贫瘠到知识丰富的学习..... 51

4.4.7 从直接到声明性的模型..... 51

4.5 研究方法和评估面临的挑战..... 51

4.6 总结..... 52

参考文献..... 53

第 5 章 认知无线网络中的动态频谱管理和联合无线资源管理..... 56

5.1 概述..... 56

5.1.1 动态频谱管理的基本框架..... 57

5.1.2 动态频谱管理与网络规划的比较..... 59

5.1.3 动态频谱管理发展与应用规划..... 60

5.2 认知无线网络中的动态频谱管理及其分类..... 60

5.2.1 动态频谱分配技术..... 61

5.2.2 动态频谱共享技术..... 61

5.3 动态频谱管理研究现状..... 61

5.3.1 基于动态频谱管理的体系架构..... 61

5.3.2 同构网络的动态频谱管理..... 63

5.3.3 异构网络的动态频谱管理..... 64

5.4 动态频谱分配技术..... 65

5.4.1 动态频谱分配的基本概念..... 65

5.4.2 基于动态频谱分配的体系架构..... 66

5.4.3 一种应用在多运营商场景下分布式动态频谱分配方法..... 67

5.5 动态频谱共享技术..... 84

5.5.1 动态频谱共享技术的分类..... 84

5.5.2 基于动态频谱共享的体系架构..... 86

5.6 联合无线资源管理..... 90

5.6.1 概述..... 90

5.6.2 联合无线资源管理的功能模块..... 91

5.7 联合无线资源管理的分类..... 91

5.7.1 联合会话接纳控制..... 91

5.7.2 联合会话调度..... 107

5.7.3 切换和联合负载均衡..... 109

5.8 总结..... 112

参考文献..... 112

第 6 章 Self-x 算法流程..... 117

6.1 Self-x 概述..... 117

6.2 Self-x 问题的算法需求..... 118

6.3 Self-x 算法概述..... 119

6.3.1 算法的实现..... 120

6.3.2 算法的类型..... 120

6.3.3 算法的复杂度分类..... 123

6.4 Self-x 算法应用场景..... 124

6.4.1	切换参数优化	124
6.4.2	单一网络的负载平衡	125
6.4.3	小区中断补偿	126
6.4.4	家庭基站的无线参数 优化	126
6.4.5	ICIC (小区间干扰 协调)	128
6.5	Self-x 算法举例	128
6.5.1	添加小区的自配置算法	128
6.5.2	动态自组织网络规划管理 (DSNPM) 建议算法	132
6.5.3	灵活基站的管理算法	149
6.6	Self-x 研究、标准化工作	154
6.6.1	CELTIC 项目 Gandalf	155
6.6.2	FP7 项目 SOCRATES	155
6.6.3	IEEE 802.16	156
6.6.4	NGMN	156
6.6.5	3GPP	157
	参考文献	158

7.5	跨层的应用领域	170
7.5.1	3G 蜂窝网络	171
7.5.2	无线区域网络	171
7.5.3	无线局域网络	171
7.5.4	异构网络垂直切换	171
7.6	基于模型的跨层优化开发	171
7.6.1	引言	171
7.6.2	应用驱动的跨层优化	173
7.6.3	参数抽象方案	173
7.6.4	跨层优化	174
7.6.5	性能评价	177
7.7	跨层优化实例分析	182
7.7.1	引言	182
7.7.2	问题描述	183
7.7.3	动态子载波分配	185
7.7.4	自适应功率分配	187
7.7.5	效率和公平性	190
7.7.6	数值结果	191
	参考文献	193

第 7 章	跨层设计	160
7.1	跨层设计的概述	160
7.1.1	跨层产生的背景	160
7.1.2	跨层的必要性	161
7.1.3	跨层设计的定义	161
7.1.4	跨层存在的问题和 挑战	162
7.1.5	认知无线网络中的 跨层	163
7.2	跨层设计架构和实现	163
7.2.1	跨层设计架构	163
7.2.2	跨层设计实现	165
7.3	跨层设计的方法	166
7.4	跨层反馈机制	168
7.4.1	物理层	168
7.4.2	数据链路层	168
7.4.3	网络层	169
7.4.4	传输层	170
7.4.5	应用层	170

第 8 章	性能评估	196
8.1	引言	196
8.2	网络性能评估	197
8.2.1	小区吞吐量	197
8.2.2	流量负载	200
8.2.3	频谱效率	200
8.2.4	有用可释放面	201
8.2.5	频谱机会指数	202
8.2.6	频谱效率增益	203
8.2.7	抖动和延迟	204
8.2.8	阻塞概率	204
8.2.9	拥塞概率	204
8.2.10	区域阻塞因子	204
8.2.11	消耗评价及网络效益	205
8.3	服务性能评估	207
8.3.1	满意概率	207
8.3.2	延迟	207
8.3.3	用户吞吐量	207
8.3.4	中断概率	208

8.3.5 效用	208	9.2 IEEE	217
8.4 算法性能评估	208	9.2.1 IEEE 802.11h 标准	217
8.4.1 收敛性	208	9.2.2 IEEE 802.11y 标准	217
8.4.2 最优化	208	9.2.3 IEEE 802.16h 标准	217
8.4.3 重配置开销	209	9.2.4 IEEE 802.22 标准	218
8.4.4 主动计划的无线资源	210	9.2.5 IEEE SCC41	219
参考文献	210	9.3 ETSI	221
第 9 章 基于 CR 技术的标准化	211	9.4 软件无线电论坛	223
9.1 ITU-R	211	9.5 中国通信标准化协会	224
9.1.1 WP 1B	211	参考文献	225
9.1.2 WP 5A	212	缩略语	226
9.1.3 WP 5D	217		

第 1 章

认知无线网络

随着无线通信技术的发展，具有不同接入技术的网络重叠覆盖，用户端的业务需求更加多元化，如何在异构网络的环境下为用户提供泛在的网络接入、高质量的服务水平已成为亟待解决的问题，认知无线网络的出现为此提供了重要的思路，同时，也为提高无线资源的利用率提供了解决方案。本章将介绍认知无线网络的相关概念和关键技术。首先引出认知无线电和认知网络的概念，接着详细描述这两个概念，最后引出这两个概念的结合产物——认知无线网络。

1.1 认知无线电和认知网络概述

认知无线电（CR, Cognitive Radio）是认知无线网络中提高频谱利用率的一项关键技术，通过检测空闲频谱，为认知无线网络提供基本的频谱信息，并根据环境的变化对发射参数等进行自适应的调整。本节将对认知无线电和认知无线网络产生的背景和概念进行简要的介绍。

1.1.1 认知无线电

随着无线通信技术的飞速发展，频谱资源变得越来越紧张。尤其是随着无线局域网技术、无线个域网络技术的发展，越来越多的人通过这些技术以无线的方式接入互联网。这些网络技术大多使用非授权的频段工作。与授权频段相比，非授权频段的频谱资源要少很多，而相当数量的授权频谱资源的利用率却非常低。

为了解决频谱资源匮乏的问题，提高现有频谱的利用率，一些学者提出了认知无线电的概念。认知无线电的基本出发点是：为了提高频谱利用率，具有认知功能的无线通信设备可以机会式地工作在已授权的频段内；同时，非授权用户的接入不能对已授权频段内用户通信造成干扰。这种在空域、时域和频域中出现的可以被利用的频谱资源被称为“频谱空洞”^[1]。认知无线电的核心思想就是使无线通信设备具有发现“频谱空洞”并合理利用的能力。

1.1.2 认知网络

20 世纪末，在 Internet 的冲击下，通信网经历了深刻的变革，人们提出了下一代网络（Next Generation Network）的概念，研究思路由网络综合转向网络融合（network convergence），第一次在统一的 IP 技术基础上展现了信息通信网的融合前景。然而，随着无线通信技术突飞猛进

的发展,规模的快速扩张,以及能力的空前提高,通信网,特别是宽带接入网变得越来越复杂。面向不同应用的无线终端具有不同程度的智能性,近年来针对多制式网络适配,产业界大力研制多模终端,学术界也在积极研究基于软件无线电(SDR, Software Defined Radio)技术的可重配置终端。

为支持如此复杂的异构接入环境的融合,研究人员提出了新的融合技术思路——认知网络(cognitive network)。认知网络是指网络能够感知外部环境,通过对外部环境的理解与学习,实时调整通信网络内部配置,智能地适应外部环境的变化。CR的主要目的是支持频谱资源共享、提高无线电频谱利用率,而认知网络的主要目的是向用户提供最佳的端到端性能。

1.2 认知无线电

一直以来,关于认知无线电的定义存在很多种解释方法,下面给出几种有代表性的认知无线电的定义,并对认知无线电的特点和认知循环进行简要介绍和描述。

1.2.1 认知无线电定义

认知无线电的前提基础是软件无线电。在引出认知无线电的概念之前,本节需要对软件无线电的发展情况做简要介绍。

软件无线电是 Mitola 于 1992 年明确提出来的。根据 Mitola 的定义,理想的软件无线电台是一个有能力支持多重空中接口和协议的多波段无线电台,它的所有参数都由软件在通用的处理器上定义。软件无线电是理想软件无线电的一个折中方案:它是在现有的技术条件下用专用集成电路、现场可编程门阵列、数字信号处理器和通用处理器进行适当混合来实现的。

认知无线电是建立在软件无线电平台上的一种内容认知型的智能无线电,通过在无线域建模来扩展软件无线电的功能,通过无线知识描述语言(RKRL, Radio Knowledge Rendering Language)来提高个人服务的灵活性。它能通过学习实现自我重配置,动态自适应通信环境的变化。

自 1999 年 Mitola 博士首次提出认知无线电的概念^[2]并系统地阐述了认知无线电的基本原理以来,不同的机构和学者从不同的角度给出了认知无线电的定义^[2~4],其中比较有代表性的包括联邦通信委员会(FCC, Federal Communications Commission)和著名学者 Haykin 教授给出的定义。

根据文献[2]的定义,认知无线电技术将连续不断地认知外部环境的各种信息(如授权用户终端和认知无线电终端的工作频率、调制方式、接收端的信噪比、网络的流量分布,甚至可以是认知用户的行为和说话内容等),并对这些信息进行分析、学习和判断,然后通过无线电知识描述语言与其他认知无线电终端进行智能交流,以选择合适的工作频率、调制方式、发射功率、介质访问协议和路由等,保证整个网络能够始终提供可靠的通信,最终达到最佳的频谱利用率。认知无线电最大的特点在于智能性,这也是它与普通软件无线电最大的不同。

FCC 认为:“认知无线电是能够基于对其工作环境的交互改变发射机参数的无线电”^[5]。

Haykin 教授则从信号处理的角度出发^[6],认为认知无线电是可以认知外界通信环境的智

能通信系统。认知无线电系统通过学习，不断地认知外界的环境变化，并通过自适应地调整其自身内部的通信机理来实现对环境变化的适应，以达到改进系统的稳定性和提高频谱资源利用率的目的^[7]。

1.2.2 认知循环

认知无线电系统具有检测、分析、调整、推理、学习等过程，这一系列的过程组成认知循环，如图 1-1 所示。自适应调整的过程一方面改进了系统的稳定性，另一方面也提高了频谱资源的利用率。

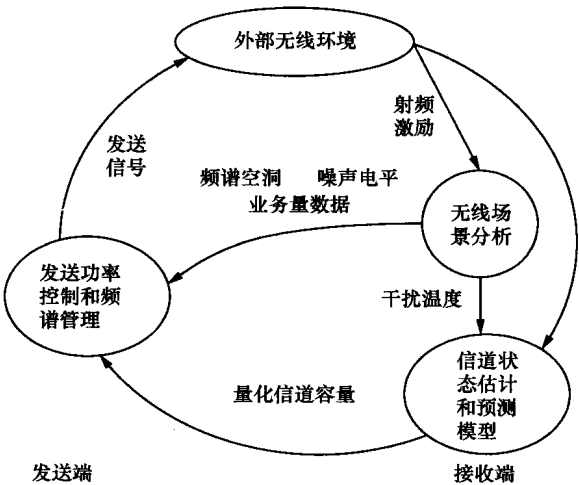


图 1-1 基本认知循环

由此可知，CR 具有以下几个特点：

- ① 对环境的感知能力；
- ② 对环境变化的学习能力；
- ③ 对环境变化的自适应性；
- ④ 通信质量的高可靠性；
- ⑤ 频谱资源的高利用度；
- ⑥ 系统功能模块的可重构性。

1.3 认知网络

认知网络是在认知无线电的基础由 Motorola 及 Virginia-Tech 公司率先提出的，他们认为认知网络是一种具有认知能力的网络，能够感知网络当前的状况，并根据当前的状况来计划、决定并采取行动。Virginia-Tech 公司的 Thomas 给认知网络下了一个定义：它是一种能够感知当前网络条件并据此进行规划、调整和采取适当行动的网络。也就是说，认知网络能够感知当前网络条件并根据系统性能目标进行动态规划和配置，通过自学习和自调节，采取适当的行动来满足性能目标。这要求网络能够从认知过程中积累经验并用于今后的决策和行动，并且所有决策和行动服务于特定的系统目标。认知无线电是认知网络的一种特例，它更多考虑

如何根据网络环境来调节工作频率和频段以高效利用宝贵的无线频谱资源；而认知网络则更加重视整个网络的性能和系统总体目标。后者涉及数据传输过程中的所有网络元素，包括子网、路由器、交换机、终端、加密机制、传输媒体和网络接口等，涵盖整个网络，而不是局部范围或个别元素。

认知网络的总体目标是在较长的运行时间内以较低代价提供更好的网络端到端性能，具体的性能目标包括资源使用效率、服务质量、安全性、可管理性等。认知网络的能力和受限于底层网络单元的自适应性和认知过程的有效性，并且为此付出的代价必须是在可接受范围之内，这些代价可以用系统开销、规划成本和网络运行耗费等来衡量。一般情况下，认知网络的复杂程度要高于非认知网络。

1.4 认知无线网络

认知无线网络是一种具有认知过程的网络，它能分辨当前网络状态，然后根据这些状态进行规划、决策和响应。网络能在这些自适应过程中学习，并可以将学到的知识用于以后的决策。最终目标都是为了实现端到端的性能。

这个定义在认知方面与认知无线电的表述相似，两者都广泛地包含了许多认知和学习的简易模型。这个定义的关键是在于网络层面和端到端的部分。如果没有网络和端到端的视角，这个系统也许将成为认知无线电或者只是网络中的一层，而不是一个完整的认知无线网络。这里的端到端指的是网络所有元素都参与了同一个数据流的传播。而端到端的目标使得认知无线网络有一个全网范围内的要求，这点使其与只在本地或者单元素范围内自适应的方法区别开来。

认知无线网络应该将对网络性能的观察（或者代理观察）作为决策处理过程的输入，然后将可作用于网络中可调元素的一系列行为作为输出。理想的情况是，一个认知无线网络应该具有前瞻性而不仅仅是反应式的处理，它应该在问题出现之前就尝试校正修整。此外，认知无线网络的体系架构应该具有扩展性和灵活性，以支持未来改善的网络架构和新增的网络元素，从而实现更高层次的通信目标。认知集中在对无线环境域、网络环境域和用户域的多域认知上，完成对海量认知信息的获取，为以后的学习、决策、调整阶段提供信息输入。学习阶段主要是通过反馈环路分析行动对外界环境变化进行响应，逐步修正达到最优的行动策略目的。决策和调整阶段是针对认知信息和经验学习，选择最优的行动决策并通过重配置方式进行相应参数的调整。这个阶段涉及无线频谱资源的分配和管理、对异构无线网络资源的联合管理，期望得到资源的最大利用效率，从而获得系统性能的最大提升。为了实现这一目标，跨层设计可以通过增加层间交互的方式对相应的协议层做出最优决策和调整命令，Self-x利用其自配置、自管理、自优化的特性对网络进行实时监测和调整。本书将在后面的几章中陆续介绍这几个阶段所涉及的各项技术。

1.4.1 认知阶段

为了适应时变的无线信道环境，及时获取网络的状态信息，认知无线网络需要借助认知技术，来实现无线资源的有效利用和网络性能的整体提升。由于未来必定是多种异构网络共存的局面，用户可以根据网络的运行状况来自主选择要接入的性能最佳的网络，从而为用户

提供最好的端到端 QoS (Quality of Service) 保证, 认知为这一目标的实现提供了重要的手段。为了提高认知的效率和完备性, 充分认知环境的变化, 认知域需要由传统的单一无线环境扩展为包括无线环境、网络环境和用户环境在内的多域认知环境。

传统的静态、局部的频谱分配策略已经不能解决日渐突显的频谱匮乏问题, 如何有效地整合空闲的频谱资源并动态地进行分配变得尤为重要。因此目前关于认知的研究也主要集中在对“频谱空穴”的感知上, 检测空白频谱并重新分配, 提高资源的利用效率。主要相关的技术有: 信号检测技术、感知导频信道 (CPC, Cognitive Pilot Channel) 技术、数据库技术。

1.4.2 学习阶段

学习阶段是当外界环境参量发生变化时, 系统感知此变化并做出相应的动作响应, 通过动作响应的结果, 判断对系统性能的影响。对系统响应结果进行学习, 并将学习结果输入策略库, 以便下次发生相同的变化时采取经验条件下最优的行动策略。简而言之, 期望通过经验学习来获得系统性能的提升。当用户感知到对外界环境的某些参数后, 做出决策并作用于外界环境, 外界环境给认知用户一个反馈, 学习阶段就是逐步分析这些反馈, 以达到最佳策略, 继而完成学习的过程。相关的学习方法主要有: 监督学习、非监督学习和半监督学习。

1.4.3 决策和调整阶段

1. 频谱管理

由于认知无线网络中用户对带宽的需求、可用信道的数量和位置都是实时变化的。频谱分配技术将一些不规律和不连续的频谱资源进行整合, 按照一定的公平原则将频谱资源分配给不同的用户, 实现资源的合理分配和利用。自适应频谱资源分配的关键技术主要有: 载波分配技术、子载波功率控制技术、复合自适应传输技术。为了协调授权用户和非授权用户间的关系, 提高频谱管理的效率, 新的频谱管理思想和管理规则亟待提出, 以适应用户的需求和技术的发展。

2. 联合无线资源管理

各种异构无线接入技术 (RAT, Radio Access Technology) 共存将会是未来无线网络环境的一大特点。具体来说, 各种无线接入技术将会出现重叠覆盖, 各自面向不同的服务要求, 技术特性之间存在互补性。这些特点使得异构无线接入技术之间的资源共享成为可能, 由此提高系统性能和资源利用率, 带来更好的用户体验。

联合无线资源管理 (JRRM, Joint Radio Resource Management) 用于多个异构无线接入网之间的无线资源分配, 它通过联合会话接纳控制、联合会话调度、联合负载控制和切换等功能来实现更高的系统性能和频谱效率。

3. 跨层设计

所谓跨层优化设计, 是通过在网络各层间共享与其他层相关的信息, 利用各层之间的相关性, 将各层协议集成到一个综合的分级框架中, 对无线网络进行整体设计的一种思想。这种设计模糊了严格的层间界限, 打破传统的通信系统分层框架, 将分散在网络各个子层的特性参数协调融合, 使得协议栈能够以全局的方式适应特定应用所需的 QoS 和网络状况的变

化, 根据系统的约束条件和网络特征来进行综合优化的方式。跨层的设计思想, 实现了对网络资源的有效分配, 达到了提高网络的综合性能, 为用户提供更好服务的目的。

4. Self-x 技术

下一代网络融合了多种异构网络, 这极大地增加了网络管理的复杂性, 针对此问题, 研究人员提出了基于自主计算 (AC, Autonomic Computing) 的异构无线网络自主管理架构。

自主计算的概念最早由 IBM 在 2001 年提出。所谓自主计算, 即通过设计、构建一个能够自管理的计算系统来实现系统的自我管理, 以便将管理人员从复杂管理任务中解脱出来, 降低系统的复杂性, 减少管理成本。它的本质是由系统主动监视自身的运行状态, 并按照管理策略针对不同的运行状态自动执行相应的调整系统操作。自主计算的核心思想是实现自主管理 (Self-management) 功能, 主要表现为: 自配置 (Self-configuring)、自恢复 (Self-healing)、自优化 (Self-optimizing)、自保护 (Self-protecting)。以上自主管理的功能也被称为 Self-x。

参考文献

- [1] Mitola J. Cognitive radio: Making software radios more personal. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13-18.
- [2] Mitola J. Cognitive radio [D]. Stockholms, Swedrn: Royal Institute of Technology (KTH), 2000.
- [3] Mitola J. Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications//Sixth International Workshop on Mobile Multimedia Communications (MoMuC'99), San Diego, CA, November 1999.
- [4] Notice of proposed rule making and order [R]. FCC Et Docket no. 03-322, 2003.
- [5] Haykin S. Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23 (2):201-220.
- [6] 王军, 李少谦. 认知无线电: 原理、技术与发展趋势. 中兴通讯技术, 2007, 13(3):1-4.
- [7] Mitola J. Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio. PhD thesis, Royal Institute of Technology (KTH), 2000.

第 2 章

认知无线网络体系架构

认知无线网络的研究以适应性的体系结构为核心问题，主要研究了认知、动态频谱管理、无线传输、端到端重配置等问题，根据认知循环，将整个过程分为感知、决策调整、学习 3 个阶段，每个阶段都要设计相应的模块来实现认知无线网络的需求。模块的设计根据相应的架构来实现，因此，本章将对两种经典的认知无线网络架构以及各个模块的功能进行介绍。

2.1 认知无线网络的体系架构概述

认知无线网络是一种具有认知功能的网络，它可以获得当前网络运行的实时状态信息，然后根据这些状态信息进行规划、决策和响应，网络在这种自适应过程中进行学习并将学到的知识用于以后的决策，其目标是实现端到端性能的提高。采用认知无线电技术的认知无线网络，不仅包括了认知无线电技术，同时从网络层面提出了更多、更高的要求；无论是网络元素还是网络结构和功能都增添了很多新变化。认知无线网络将各种现有的或未来的具有认知能力、重配置能力的无线接入技术及具有认知能力、重配置能力、可以同时保持多条链路的用户设备整合到一个通用的网络框架中，实现各种异构无线网络的融合，以最大程度地提高无线网络资源利用效率，增强业务能力，改善用户体验。

以适应性为特征的体系结构是认知无线网络的核心问题，其研究内容包括以下几个方面。

1. 认知无线网络中的认知技术

认知无线网络必须先通过一定认知技术获取内、外部环境的信息，包括无线环境、网络环境等。目前研究者比较关注的是无线频谱环境的认知，例如频谱占用情况等，然后基于认知的结果实现对网络的配置和对无线资源的管理。频谱感知（检测）技术的目的是找到空闲的频谱，这需要各个接入网络有足够的的能力来捕获频谱使用的信息，发现频谱空洞。

2. 动态频谱管理

目前，频谱是各国无线电管理机构以颁发许可的方式进行固定分配的。这种频谱管理的方式有效地控制了不同网络使用频谱之间所产生的干扰，但是同时也导致了频谱利用的低效。与静态频谱分配（FSM, Fixed Spectrum Management）相比，动态频谱管理/分配

(DSM/DSA, Dynamic Spectrum Management/Allocation) 可以根据各个网络的频谱需求来动态分配频谱。随着软件无线电和重配置技术的发展, 动态频谱分配不再是一个空想的概念, 已经一步步走向现实。

动态频谱管理是一种针对异构无线通信系统的宏观的无线频谱管理, 是一组网络控制机制的集合。它应用于融合多种无线接入网络的异构无线通信系统中, 能够支持动态的、智能的、合理有效的分配策略, 使得各个接入网络在不同的时间粒度上协商分配有限固定的无线频谱资源, 从而实现提高异构网络频谱使用率和系统收益最大化的目标。动态频谱分配操作的时间粒度为小时或分钟级。

3. 智能联合无线资源管理

多种异构无线接入技术的共存将会是未来无线网络环境的一大特点。具体来说, 各种无线接入技术将会出现重叠覆盖, 各自面向不同的服务要求, 技术特性之间存在互补性。这一特点使得异构无线接入技术之间的资源共享成为可能, 由此提高系统性能和资源利用率, 带来更好的用户体验。

联合无线资源管理管理多个异构无线接入网之间的无线资源分配, 它通过联合会话接纳控制、联合会话调度、联合负载控制和切换等功能来实现更高的系统性能和频谱效率。其调控时间粒度为分钟或秒级。

4. 认知导频信道

随着异构网络融合研究的发展, 近期出现了认知导频信道 (CPC) 这个概念。

在异构的无线网络环境背景下, 无线终端选择一个最佳的无线接入点以一种最合适的无线接入技术接入网络是十分必要的。但由于动态频谱分配机制的存在, 终端在开机时无法获取频谱情况, 这时就需要通过 CPC 获得运营商和接入网的存在信息以及优先选择列表等信息, 选择最合适的接入网。

5. 端到端重配置

异构无线网络融合是移动通信系统发展的重要趋势。由于缺乏有效的协调, 目前存在的多种 RAT 构成了孤岛般相对独立的自治域, 系统间的干扰、重叠覆盖、重复的投资建设、单一的业务提供能力、稀缺的频谱资源等现实问题使得网络融合变得难以解决。实现异构技术的有效融合与协同工作, 异构资源的优势互补和协调管理, 不仅是技术发展的必然趋势, 也是网络运营商实现最佳用户体验和最优的资源利用的根本途径。以软件无线电技术为基础的端到端重配置 (E2R, End-to-End Reconfiguration) 技术为我们提供了一个技术融合的最佳契合点。

端到端重配置通过扩展终端乃至基站的动态协议栈配置和软件下载功能, 添加必要的网元实体和支持功能, 设计相关的设备管理和资源管理机制和流程, 让无线终端和网络根据各方需求灵活地在不同 RAT 间进行选择, 从端到端的视角实现了泛在的无线接入、无缝的业务提供、动态的资源优化。

6. 基于认知的无线传输

为了在新型基于认知的无线网络的不同网络模式下充分利用频谱资源以实现信息高效传输, 我们需要研究环境和资源自适应的传输信息处理理论和方法, 充分利用包括