

无线通信前沿技术丛书

李少谦 周亮 主编

该书由国家自然科学基金(No.61071102, No.61001085, No.61271168), 973计划项目(No.2009CB320405), 863计划项目(No.2009AA011801), 国家“新一代宽带移动通信网”重大专项课题(No.2009ZX03007-004, No.2013ZX03004009-004), 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(博导类)(No.20130185110005), 中央高校基本业务费项目(ZYGX 2009X002, ZYGX2013J109, ZYGX2011X019)联合资助



“十二五”
国家重点
出版规划丛书

认知无线网络 无线传输技术

● 李少谦 王军 陈劼 陈亚丁 唐万斌 刘军 谭雪松 © 著

Wireless Transmission Technologies
for Cognitive Radio Networks



国防工业出版社

National Defense Industry Press

无线通信前沿技术丛书/李少谦 周亮 主编

该书由国家自然科学基金 (No. 61071102, No. 61001085, No. 61271168), 973 计划项目 (No. 2009CB320405), 863 计划项目 (No. 2009AA011801), 国家“新一代宽带移动通信网”重大专项课题 (No. 2009ZX03007-004, No. 2013ZX03004009-004), 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题 (博导类) (No. 20130185110005), 中央高校基本业务费项目 (ZYGX2009X002, ZYGX2013J109, ZYGX2011X019) 联合资助

认知无线网络无线传输技术

Wireless Transmission Technologies
for Cognitive Radio Networks

李少谦 王军 陈劼 陈亚
唐万斌 刘军 谭雪梅



国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

认知无线网络无线传输是认知无线网络信息传输的基础，是集成了物理层、MAC层、网络层、传输层及跨层联合优化的系统性技术。本书立足当前认知无线网络无线传输方向的研究现状和发展趋势，同时兼顾了认知无线网络无线传输的理论原理和关键技术，从频谱感知、传输波形设计、动态频谱接入、认知多跳传输和联合优化技术5个方面，对认知无线网络无线传输进行了全面介绍和探讨。

本书可供从事认知无线电、认知无线网络系统设计、应用、研究的工程技术人员及其他无线通信专业的工程技术人员学习参考，也可作为高等院校通信与信息系统和电子工程专业师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

认知无线网络无线传输技术/李少谦等著. —北京:国防工业出版社, 2014.8

(无线通信前沿技术丛书)

ISBN 978-7-118-09593-7

I. ①认… II. ①李… III. ①无线电通信—移动网—无线传输技术
IV. ①TN929.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第171041号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 17¼ 字数 389千字

2014年8月第1版第1次印刷 印数 1—2500册 定价 79.00元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

序 言

移动互联网与智能移动终端的持续高速增长，导致无线通信系统对频谱资源的需求不断增加，使得适宜于无线通信服务的频谱资源变得日渐稀缺，成为了制约无线通信发展的新瓶颈。1998年，Joseph Mitola III博士提出了认知无线电的概念。2005年，Virginia Tech的Ryan W. Thomas等人提出了认知网络的概念。认知无线电和认知无线网络技术可提高频谱资源整体利用效率，是无线通信的战略性发展方向之一。

认知无线电和认知无线网络的概念一经提出，就受到了高度关注，其涉及的理论和关键技术成为全球通信工业和学术界的研究热点。我国也高度重视认知无线电和认知无线网络的研究，从“十五”末期开始就在国家“863”计划中启动了有关认知无线电技术的前期研究工作。在“十一五”期间，国家分别从基础理论、关键技术和实验验证的侧面，进一步加强了对认知无线电和认知无线网络研究的力度。目前，我国在认知无线电和认知无线网络领域取得了很多重要的研究成果，处于了国际先进水平，在ITU、IEEE等国际标准化组织的相关标准化中取得了较重要的话语权。

本书作者的课题组是国内较早开展认知无线网络研究的课题组之一，致力于认知无线网络技术的攻关、实现和应用推广。本书是作者近年来在认知无线网络方向研究成果的提炼和整理，部分研究成果填补了该领域的空白。

无线传输为认知无线网络提供信息传输的机制和方法，是认知无线网络最重要的基础性技术之一。本书涵盖了认知无线网络无线传输的两个主要方面：智能控制机制和无线传输机制。智能控制机制基于对环境和业务信息的感知，生成无线传输参数，控制无线传输的载波、频率、功率等；无线传输机制则生成满足需求的无线传输波形、协议和模式，完成业务传输。

本书体系完整、层次清晰、图文并茂，并提供了示例，保证了全书内容的学术性、系统性和可读性。本书可以作为相关研究人员和感兴趣读者的参考书。相信本书的出版，将为我国认知无线电和认知无线网络的研究以及应用起到积极的作用，并进一步促进我国无线通信的持续高速发展。

李少谦

2014年5月于成都

前 言

当前,适宜无线通信的频谱资源一方面十分稀缺,一方面又浪费严重。其原因在于:静态的频谱规划体制与动态的频谱利用方式之间不匹配,造成无线频谱规划紧张,整体使用率较低。从系统级的角度提高频谱资源整体利用效率的认知无线电(Cognitive Radio, CR)和认知无线网络(Cognitive Radio Networks, CRN)应运而生,是解决上述矛盾的重要技术途径。

1998年,Joseph Mitola III博士首先提出了认知无线电的概念。2005年,在IEEE认知无线电领域的旗舰会议DySPAN的一篇论文中,来自Virginia Tech.的Ryan W. Thomas等人首先提出了认知的概念。此后,全球工业界和学术界开始大规模研究认知无线电的理论和关键技术。我国在“十五”开始末,通过“863”计划启动了认知无线电的研究工作。“十一五”期间,国家“863”、“973”计划和自然科学基金等,进一步加强了对认知无线电和认知无线网络研究的支持。

认知无线电具备环境感知和学习能力,能够根据环境的变化自主地做出决策,调整系统参数,实现优化的资源利用。认知无线网络是由具备认知无线电能力的节点构成的网络。从某种意义上说,认知无线网络是具有“智慧”或“智能”的网络。认知无线网络表现出通过自治方式完成认知过程任务的特性。这些自治方式包括自我管理、自优化、自监测、自修复、自保护、自适应和自愈合等。认知无线网络的基础是认知无线电,然而,却将认知特性延伸到整个网络架构及协议之中。

认知无线网络的关键技术涉及系统体系架构、协议、无线传输等多个层面。由于内容较多和篇幅的限制,这些内容在《认知无线网络无线传输技术》和《认知无线网络组网与应用》两本书中分别介绍。

认知无线网络的无线传输由智能控制机制和无线传输机制构成。其中,智能控制机制通过对环境和业务的感知,确定无线传输的载波、频率、功率等参数;无线传输机制利用无线传输波形、协议和模式,完成业务传输。从协议的角度,认知无线网络的无线传输涵盖了物理层、MAC层、网络层和传输层及其联合优化设计。从关键技术层面,认知无线网络的无线传输包括了频谱感知、物理层传输波形设计、动态频谱接入控制、认知多跳传输和联合优化设计。

本书共分为6章。第1章介绍了认知无线电和认知无线网络的起源、发展和应用情况,说明了无线传输在认知无线网络中的地位和作用,阐述了认知网络无线传输的基本原理和涉及的关键技术。第2章详细介绍了认知无线网络无线传输中的频谱感知技术,涉及了单节点频谱感知和多节点频谱感知的原理和关键技术。第3章针对认知无线网络用户与主用户的两类共存场景中,波形设计面临的主要挑战和关键问题,阐述了基于非连续正交频分复用的频谱自适应传输波形设计技术,和基于多天线的传输波形设计技术。第4章介绍了基于间插式场景的动态频谱接入技术,分析了集中式认知无线网络架构中的动态频谱接入技术的性能,讨论了分布式动态频谱接入技术面临的挑战与分类,介绍

了基于 POMDP、无悔学习和 Q 学习的三种分布式动态频谱接入算法。第 5 章介绍了认知无线网络多跳传输中的协作中继传输、路由和自适应传输控制机制等关键技术,描述了基于认知无线网络的协作中继传输机制、基于链路维持概率的路由协议、基于频谱变化和节点运动变化的自适应传输控制机制。最后,第 6 章讨论了认知无线网络无线传输中的联合优化问题,从最大化平均吞吐量和平均效用的角度,分别介绍了频谱感知与功率分配的联合优化、自适应接入与传输机制的联合优化、自适应功效传输与分组调度的联合优化。

本书第 1 章由李少谦执笔,第 2 章由陈亚丁执笔,第 3 章由王军执笔,第 4 章由唐万斌执笔,第 5 章由刘军、谭雪松执笔,第 6 章由陈劼执笔,全书由李少谦、王军统稿和审阅。本书是作者长期从事认知无线网络无线传输技术研究的成果提炼。曾经或正在电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室学习的博士生朱江、何浩、孙杰、喻火根,硕士生傅晓、张世昌、彭启航、陈磊、漆春梅、陈伟、李智、路瑶、杨潢、杨松、李洪宇等对认知无线传输的理论和关键技术进行了广泛而深入的研究,他们所取得的有关成果对完成本书起到了重要作用,作者在此一并向他们表示感谢!

本专著获得了国家自然科学基金(No. 61071102, No. 61001085, No. 61271168), 973 计划项目(No. 2009CB320405), 863 计划项目(No.2009AA011801), 国家“新一代宽带移动通信网”重大专项课题(No. 2009ZX03007-004, No. 2013ZX03004009-004), 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(博导类)(No.20130185110005)、成都市高校院所应用基础研究项目(No. 12DXBYB095JH-005), 中央高校基本业务费项目(ZYGX2009X002, ZYGX2013J109,ZYGX2011X019)的资助。

由于作者水平所限,不足之处在所难免,恳请专家和读者批评指正。

作者

2014 年 5 月

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 认知无线电与认知无线网络简介	1
1.1.1 认知无线电与认知无线网络的起源与发展	1
1.1.2 认知无线电与认知无线网络的概念与原理	4
1.1.3 认知无线电与认知无线网络的应用、政策与标准化	7
1.2 认知无线网络无线传输的原理与关键技术	22
1.2.1 认知无线网络无线传输的基本原理	22
1.2.2 认知无线网络无线传输的关键技术	23
1.3 本书的章节安排	33
参考文献	35
第 2 章 频谱感知技术	39
2.1 概述	39
2.2 单节点频谱感知	39
2.2.1 匹配滤波检测	40
2.2.2 能量检测	40
2.2.3 周期特性检测	41
2.2.4 基于协方差特征检测	43
2.3 多节点协同频谱感知	46
2.3.1 协同频谱感知系统结构	46
2.3.2 节点数据软合并	47
2.3.3 节点数据硬合并	49
2.3.4 压缩感知	56
2.4 频谱感知应用设计	57
2.4.1 DVB-T 信号的检测算法	57
2.4.2 干扰评估	59
2.4.3 检测信号覆盖范围	67
2.4.4 感知帧结构的优化设计	69
2.5 小结	77
参考文献	78
第 3 章 物理层传输波形设计	81
3.1 概述	81
3.1.1 间插式共存中的波形设计	81

3.1.2	叠加式共存中的波形设计	82
3.2	频谱自适应波形设计	82
3.2.1	NC-OFDM 信道估计技术	84
3.2.2	NC-OFDM 带外辐射抑制技术	96
3.2.3	认知 OFDM 子载波功率分配技术	104
3.3	多天线共存波形设计	115
3.3.1	下行链路多用户波束成形设计	115
3.3.2	上行链路多用户、多天线宽带波形设计	123
3.4	本章小结	131
	参考文献	131
第 4 章	动态频谱接入技术	134
4.1	概述	134
4.2	集中式网络架构中的动态频谱接入性能分析	134
4.2.1	融合接入策略的动态频谱共享无线通信系统建模	135
4.2.2	性能指标求解	141
4.2.3	数值分析与仿真结果分析	147
4.3	分布式网络架构中的动态频谱接入技术	151
4.3.1	分布式动态频谱接入技术面临的挑战与分类	152
4.3.2	基于 POMDP 的分布式动态频谱接入算法	155
4.3.3	基于无悔学习的分布式动态频谱接入算法	163
4.3.4	基于 Q 学习的多信道有记忆动态频谱接入算法	169
4.4	本章小结	178
	参考文献	178
第 5 章	认知无线网络多跳传输技术	181
5.1	概述	181
5.1.1	认知无线网络协作中继技术	181
5.1.2	认知无线网络多跳路由技术	181
5.1.3	认知无线网络适变传输控制技术	182
5.2	认知无线网络协作中继传输技术	182
5.2.1	相关研究	183
5.2.2	认知无线网络协作中继传输模型	183
5.2.3	认知无线网络中继选择机制	187
5.2.4	仿真结果及分析	189
5.3	基于节点移动的认知无线网络路由技术	193
5.3.1	节点移动认知机制	193
5.3.2	基于节点移动的认知无线网络路由算法	198
5.3.3	算法仿真与分析	203
5.4	适变传输控制机制	206
5.4.1	网络场景	207

5.4.2	基于频谱认知的网络适变传输控制机制	208
5.4.3	基于节点移动的认知无线网络适变传输控制机制	215
5.5	本章小结	222
	参考文献	223
第6章	认知无线传输中的联合优化技术	226
6.1	概述	226
6.2	频谱感知与功率分配联合优化	227
6.2.1	多信道频谱感知与功率分配联合优化	227
6.2.2	基于感知信道选择的频谱感知与功率分配联合优化	231
6.3	自适应接入和分组传输联合优化	236
6.3.1	系统模型与问题规划	236
6.3.2	优化求解方法	244
6.3.3	仿真结果及分析	251
6.4	自适应功效传输和分组调度联合优化	253
6.4.1	系统模型与问题规划	253
6.4.2	优化求解方法	260
6.4.3	仿真结果及分析	266
6.5	本章小结	269
	参考文献	270
	缩略词表	272

第 1 章 引 言

1.1 认知无线电与认知无线网络简介

1.1.1 认知无线电与认知无线网络的起源与发展

Joseph Mitola III 博士在 1998 年首先提出了认知无线电 (Cognitive Radio, CR) 的概念。他在 1999 年发表的一篇文章^[1]中描述了如何通过一种称为无线知识表示语言 (Radio Knowledge Representation Language, RKRL) 增强个人服务的灵活性, 并给出了无线认知环推理模型。在另一篇文章^[2]中, 他提出了频谱池 (Spectrum Pooling) 的概念, 指出可以通过频谱池技术拓展传统和 3G 系统的可用带宽, 描述了如何通过认知无线电技术实现频谱池。2000 年, Joseph Mitola III 在其博士论文^[3]中进一步系统地阐述了上述概念和方法, 给出了下述有关认知无线电的定义:

“认知无线电这个术语确定了这样一个观点, 即无线个人数字助理 (PDAs) 和相关的网络对于无线资源和相关的计算机与计算机之间的通信具有足够的计算智能, 包括: 作为用户环境的函数检测用户的通信需求, 并且提供满足这些需求的最适当的无线资源和服务”。

可以说, Joseph Mitola III 博士开创了认知无线电领域, 被公认为“认知无线电”这一概念的创始人。

此后, Joseph Mitola III 博士提出的频谱池概念受到了德国 Karlsruhe 大学 Friedrich Jondral 教授的关注, 他领导的研究组在德国联邦研究和科技部 (Federal Ministry of Research and Technology) 移动通信项目 (Mobile Communication Program) 的资助下, 开展了频谱池相关技术的研究, 开发了一个基于正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 技术、中心控制的频谱池体系架构^[4], 为认知无线电迈向现实应用提供了一个可借鉴的实例。

随着通信系统对频谱资源需求的不断增加, 美国联邦通信委员会 (Federal Communications Commission, FCC) 开始重新考虑频谱管理政策。2003 年 5 月, FCC 召开了认知无线电研讨会, 讨论了利用认知无线电技术实现灵活频谱利用的相关技术问题。此后, FCC 给出了认知无线电的定义^[5]:

“认知无线电是指能够通过与工作环境交互, 改变发射机参数的无线电设备。认知无线电的主体可能是软件无线电 (Software Defined Radios, SDR), 但既没有软件也没有现场可编程的要求”。

FCC 描述了 5 个可能的应用领域。

- (1) 在低人口密度和低频谱使用率 (如郊区) 的区域可以增加发射功率 8dB;
- (2) 主用户 (Primary User, PU) 可以以中断的方式向次级用户 (Secondary User, SU) 租借频谱;

- (3) 利用用户的空间和时间特性动态协调频谱共享;
- (4) 促进不同系统间的互操作;
- (5) 利用发射功率控制和环境判决实现多跳射频网络 (multi-hop RF network)。

随着对认知无线电的研究不断深入, 研究内容逐步从链路级的拓展到网络和系统级的研究, 研究者进一步提出了认知无线网络 (Cognitive Radio Networks, CRN) 的概念^[6-10]。2005 年, 在 IEEE 认知无线电领域的旗舰会议 DySPAN 的一篇论文中^[6], 来自 Virginia Tech. 的 Ryan W. Thomas 等人首先提出了认知网络 (Cognitive Networks) 的概念。他们指出: “认知网络具有一个认知过程, 它能感知当前网络状态, 然后基于这些状态来计划、决策并行动。在完全考虑端到端的目标之后, 这种网络能从这些自适应中学习并利用它们来做出将来的决策”。

美国 UC Berkley 大学的 Brodersen 教授领导的研究组提出了基于认知无线电方式使用虚拟 unlicensed 频谱的 CORVUS 体系结构^[6]。该体系结构与德国 Karlsruhe 大学 Fiedrich Jondral 教授给出的结构非常类似, 只是通过用户分组放宽了对中心控制的要求。Rutgers 大学的 WINLAB 实验室在美国国家自然科学基金的资助下, 与 Georgia Institute of Technology 和 Lucent Bell 实验室联合研发了认知无线电实验平台^[7], 该平台涵盖了从物理层到网络层的所有功能, 研究通过认知无线电技术进行开放的频谱接入的算法和协议及其相关技术^[8]。

同时, 美国国防部高级研究计划署 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 也资助了下一代 (XG) 项目, 使得美国军用通信设备可以检测环境变化, 根据所处环境的频谱管理政策选择频谱^[6]。2006 年 8 月, DARPA 在 Virginia 的不同地点对 XG 无线电台进行了验证, 证明了其具有的 CR 能力。验证显示, XG 无线电台可以在 500ms 内终止对信道的占用, 并在 200ms 内重建通信连接, 满足了设计目标^[9]。

2008 年, 由 FCC 工程技术办公室 (Office of Engineering and Technology, OET) 对来自 Adaptrum、新加坡 I²R、Microsoft、Motorola 和 Philips 电子北美的频谱感知设备进行了实验室外场测试, 验证了频谱感知技术对 TV 工作频段内的 Part 74 无线麦克风信号的感知能力^[9]。

欧洲方面, 欧盟 2002 年启动的第六框架 FP6 IST (信息社会技术), 开展了对认知无线电和认知无线网络的研究。其中, 在面向下一代网络研究的端到端可重配置 (E²R) 项目中, 开展了基于协作的动态频谱共享技术的研究, 并在该项目的第二阶段 (2006~2007 年), 着手开展了面向实验验证的研究。欧盟 2008 年启动的 FP7 又加大了研究的力度, 投入经费近 5000 万欧元。其中具有代表性的是欧盟 FP7 重点大型跨国项目端到端的效率 (E3), 其前身为欧盟 FP6 项目 E²R, 经费达 1500 万欧元。E3 的目标是保证应用和服务在异构网络环境下的无缝接入, 将从网络的角度优化频谱的使用, 涉及认知无线电和认知网络的技术、商业、规划和标准化等各个方面, 研究成果将直接输出到国际电信联盟 (ITU)、第三代伙伴项目 (3GPP)、美国电气电子工程师学会 (IEEE) 等标准化组织。

在英国, 英国电信 (British Telecommunication, BT) 针对英国电视频段的频谱资源 (TV White Space, TVWS) 共享进行了深入的研究, 分析了利用 TVWS 可能获得的网络容量, 并提出了一些应用模式^[10]。

我国从“十五”末开始就在国家“863”计划启动了有认知无线电和认知无线网络技术的前期研究工作。在“十一五”期间, 国家分别从基础理论、关键技术和实验验证的

角度，进一步加强了对认知无线电和认知无线网络领域研究的项目资助，其中比较重要的研究项目包括：

(1) 国家自然科学基金“认知无线电”重点项目群(2009~2012)。该项目群的宗旨是：研究认知无线电中的关键技术，重点解决频谱认知、动态频谱管理和抗干扰等问题，并通过应用于已有的无线通信系统，如短波、超短波、移动通信与卫星通信等，验证认知无线电技术，推动智能化无线网络的发展。

(2) 国家 973 计划项目：“认知无线网络基础理论与关键技术研究”(2008~2013)。该项目的总体目标是：为国家中长期信息领域的若干前沿技术和重大专项研究提供坚实的理论基础。在基础理论与关键技术方面取得一批具有原创性的研究成果并达到国际领先水平，面向 ITU、IEEE、3GPP 等国际标准化组织，形成认知无线网络的一系列具有自主知识产权的国家、国际标准。拟提出的主要标准包括：认知无线网络体系结构的相关标准；多域认知相关标准；认知网络自主传输、资源管理控制机制相关标准；端到端重构相关标准；创建基于多平面的认知无线网络体系模型与理论；建立多域认知理论与方法；提出基于认知的自主无线传输、资源管理和控制原理与机制；创建自主端到端重构理论并给出重构机理。

(3) 国家 863 计划重点项目：“频谱共享无线通信系统”(2009~2012)。该项目的总体目标是：突破频谱资源共享无线通信系统的关键技术，研究与现有系统共存的宽带无线通信系统；进行频谱资源共享无线通信系统的应用研究，并在 694~806MHz 频段进行演示验证；建立动态频谱共享系统的测试评估体系和相应的测试方法，并进行系统级关键技术的测试评估。为无线通信多系统的融合与创新奠定技术基础，并为我国参与相关技术的国际化，特别是参加 WRC 2012 提前做好准备。

(4) 国家“新一代宽带移动通信网”重大专项课题：面向 WRC-11 的频谱有效利用关键技术研究及验证(2009~2012)。项目的总体目标是：针对 2012 年世界无线电大会相关课题 1.19，开展频谱有效利用与资源管理关键技术研究及验证，解决多网络共存与兼容问题，并通过计算机仿真对关键技术进行验证；掌握动态频谱共享利用的无线网络体系结构、动态资源管理方法与无线网络重配置等关键技术。针对典型应用场景完成相应技术方案的仿真验证。在此基础上开发实验验证平台，以验证演示关键技术，并进行测试评估。向国际、国内标准化组织提交技术提案。

随着上述国家级研究项目的实施和逐步完成，我国在认知无线电领域取得了一大批具有世界影响力的成果，使得我国在认知无线电领域的研究和开发工作与世界同步。特别值得一提的是：由电子科技大学牵头，联合西安交通大学、东南大学、北京邮电大学、华中科技大学、北京交通大学、上海交通大学、上海无线通信研究中心、中国科学院声学研究所、工业和信息化部电信传输研究所、国家无线电监测中心、中国移动集团公司、华为技术有限公司共 13 个国内频谱共享无线通信领域领先的研发团队，经过三年多的协同研发，依托国家 863 计划重点项目，在频谱共享无线通信系统的“实验系统、关键技术、测试评估、标准化”四个方面，实现了全方位突破，取得了一批填补国内空白、与国际同步的重要创新成果。成功构建了国内首个基于认知无线电、具有动态频谱资源宽带无线通信实验验证网络(Dynamic Spectrum Sharing Networking, DySNet)，2011~2012 年分别在成都和上海成功进行了外场试验。DySNet 工作在 694~806MHz 频段，由 8 个网络节点组成，单节点覆盖面积超过 1 平方公里，支持集中式、分布式、混合式三种网络架构，在与现有授权业务共存的情况下，可以提供超过

20Mbps 的峰值传输速率，支持 VoIP、交互式视频等多媒体业务。实验结果显示：DySNet 可以将工作频段的整体频谱利用效率提高 30%以上，验证了三种网络架构的技术可行性。该网络及其实验验证具有较高的创新性和良好的应用前景，为认知无线电和认知无线网络的发展与应用奠定了基础。

1.1.2 认知无线电与认知无线网络的概念与原理

如前所述，Joseph Mitola III博士和FCC以及其他研究者和组织先后从不同的角度对认知无线电和认知无线网络的概念进行了阐释。

1. 认知环

Joseph Mitola III博士提出了如图 1-1 所示的认知环模型来描述认知无线电的基本工作原理。如图所示，外界激励作为一种干扰进入认知无线网络，并被分配到认知环中等待响应。认知无线网络不断地经历观察（Observe）、定位（Orient）、制定计划（Plan）、做出决定（Decide）与执行（Act）5种状态，每种状态均涉及人工智能（Learn）。

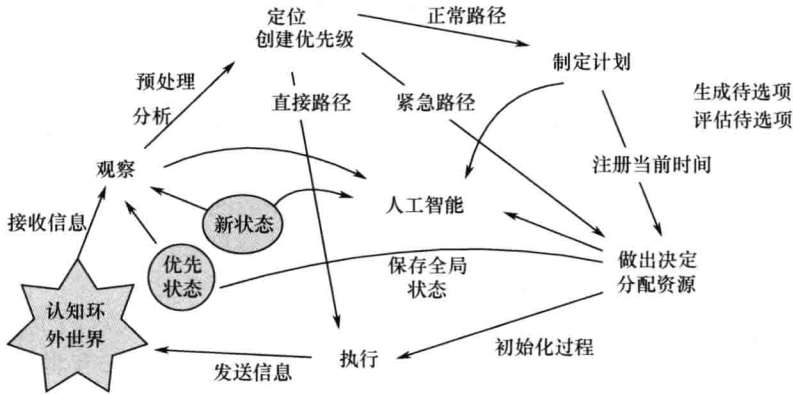


图 1-1 Joseph Mitola III博士提出的认知环模型

由于采用人工智能获取信息需要大量的运算，因此系统具有支持人工智能的睡眠周期（Sleep Epoch）和祈祷周期（Prayer Epoch）。睡眠周期指一个相对较长的时间段（数分钟至数小时），无线电在该时间段内被闲置，但具备足够功率处理数据。此时，认知无线电在不影响用户使用的情况下运行人工智能算法。在该周期内没有被处理完的智能学习将会在祈祷周期内告知用户、主网络或设计者。在唤醒周期（Wake Epoch）内，认知无线电感应设备收到的新激励将会启动一个新的认知环。认知无线电通过解析接收信息实现对环境的观察，包括对无线电广播的监听。任何提供环境感知信息的射频局域网（Radio Frequency-Local Area Network, RF-LAN）或其他短距离无线广播都会被解析。

在“观察”状态，它还会读取位置、温度等信息以推断用户的通信环境。认知无线电通过确定激励的优先级别来对自己进行“定位”：电源耗尽将直接引发“执行”（“Immediate”路径）；网络上不可恢复的信号将引发对资源的重新分配，例如，从解析接收信号到寻找可用的射频（Radio Frequency, RF）频道，这通过图 1-1 中的“紧急路径”来完成；然而通常接收到的网络消息会被处理为制定“计划”（正常路径）；“决定”状态完成从多个候选计划中选择的功能；“执行”状态则开始启动选择的进程。

Joseph Mitola III 博士的认知环模型构成其余众多认知无线电原理描述的基础。除了前述 FCC 的定义外，比较重要的还包括 Simon Haykin 和 ITU 的定义。

2. Simon Haykin 关于认知无线电的描述

Simon Haykin 教授结合 J. Mitola 博士和 FCC 对认知无线电的阐释，于 2005 年 2 月在一篇名为“Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications”的文章里，重新定义了认知无线电^[16]：

“认知无线电是一个智能无线通信系统。它能够感知外界环境，并使用人工智能技术从环境中学习，通过实时改变某些操作参数（比如传输功率、载波频率和调制技术等），使其内部状态适应接收到的无线信号的统计性变化，以达到以下目的：

- (1) 任何时间任何地点的高度可靠通信；
- (2) 对频谱资源的有效利用”。

根据上述定义，Simon Haykin 建立了认知无线电的基本认知环模型，如图 1-2 所示，主要包括 3 个部分。

- (1) 无线频谱的探测；
- (2) 信道状态估计与预测；
- (3) 发射功率控制与频谱管理。

Simon Haykin 教授的对于认知无线电的原理的描述较好地兼顾了数字信号处理、网络、人工智能和计算机软硬件实现，在该定义基础上提出的认知环模型也能较好地反映认知无线电的概念和内涵，对于指导认知无线电理论和技术的研发具有重要的意义。

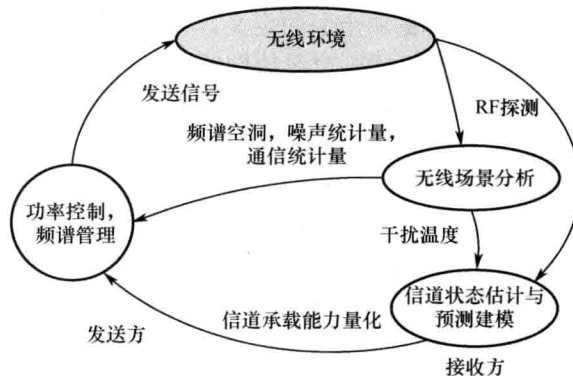


图 1-2 Simon Haykin 提出的认知环

3. ITU 关于认知无线电系统的定义

根据 ITU 的定义^[17]，认知无线电系统（Cognitive Radio System, CRS）是指“一类无线电系统，能够通过采用一些技术实现以下能力：能够获取工作地理环境、建立的政策和内部状态的知识；为了实现预定的目标，能够根据获得的知识动态、自主地调整工作参数和协议；能够从环境中学习”，其关键技术特性包括以下 3 个方面。

- (1) 获取知识的能力；
- (2) 动态和自主调整工作参数和协议的能力；
- (3) 学习的能力。

具备上述能力的 CRS 系统的概念模型如图 1-3 所示^[17]，包括智能管理系统和可重构的无线电两个部分。

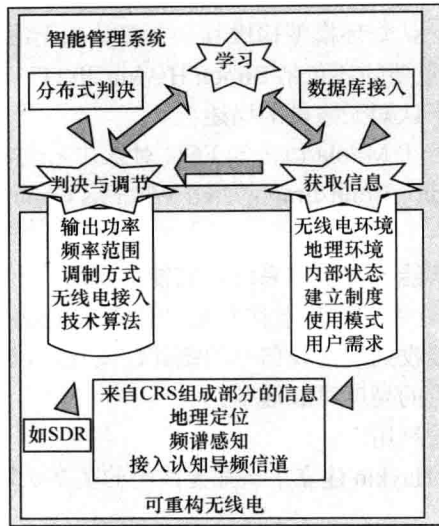


图 1-3 CRS 概念模型

4. 认知无线网络的定义

Thoms 等人在早期的文献[6]中给出了认知网络（Cognitive Network, CN）的一种定义：“认知网络具有一个认知过程，它能感知当前网络状态，然后基于这些状态来计划、决策并行动。在完全考虑端到端的目标之后，这种网络能从这些自适应中学习并利用它们来做出将来的决策”。该定义体现在集中式方法上，强调单一的信息采集、存储和分析过程。此后，文献[7]提供了一个更加全面的定义，即：认知网络系统具有一系列分布式的认知过程，这些认知过程收集标有空时特性的网络环境信息，包括从网络的每一层、节点内的每一个元素以及其他网络节点中得到的网络参数行为，来识别正确的网络参数，用于达到单独的、端到端的网络目标。文献[7]中的定义集中在分布式方法上，强调信息的空时标签特性和基于更大网络观点的信息采集、存储和分析。

文献[8]认为认知网络是包含了拥有授权频谱的主用户（Primary User）和具备认知无线电能力的次用户（Secondary Users）构成的无线网络（Wireless Networks）。认知用户利用其具备的认知能力在不对主用户造成有害干扰的情况下进行通信。文献[9]定义认知无线网络（Cognitive Radio Networks, CRN）为：“网络中的次用户终端能够对工作环境进行感知和推理，并据此自主调整收发参数来动态利用低利用率的无线资源”。文献[10]认为：“认知无线网络由多个认知用户构成，每个认知用户都可择机接入空闲频谱”。文献[10]进一步将认知无线网络架构分为集中式（Centralized）和 ad hoc 网络，前者通过中心控制单元（Central Unit）协调认知用户的频谱感知和频谱接入；后者则没有这样的中心控制单元。

结合已有的认知网络定义和认知无线网络特点，本书给出认知无线网络的定义为：“认知无线网络是具有思考、学习和记忆能力的无线网络，其通过一系列分布式的认知过程，收集标有空时特性的无线、网络及用户环境信息，从而能够综合考虑多种环境条件，并运用一定的准则和策略动态调整网络参数，以适应无线环境、网络环境和用户环境的变化，达到端到端的性能目标”。

从某种意义上说，认知无线网络是具有“智慧”或“智能”的网络。认知无线网络表现出通过自治方式完成认知过程任务的特性。这些自治方式包括自我管理、自优化、自

监测、自修复、自保护、自适应和自愈合等。认知无线网络的基础是认知无线电，然而，却将认知特性延伸到整个网络架构及协议之中。

5. 小结

根据现有关于认知无线电和认知无线网络的原理和概念的描述，可以总结出认知无线网络的基本特点如下：

(1) 认知无线网络需要具备环境感知和学习能力，能够根据环境的变化自主地做出决策，调整系统参数，实现优化的资源利用。

(2) 认知无线网络具有协议和参数的可重配置能力，软件无线电 (Software Defined Radio, SDR) 是其实现基础。

(3) 认知无线网络的关键技术涉及系统体系架构、协议、无线传输等多个层面。

本书将主要针对无线传输进行阐述和介绍。

1.1.3 认知无线电与认知无线网络的应用、政策与标准化

随着认知无线电和认知无线网络理论和技术的发展，如何利用认知无线电和认知无线网络提高 TVWS 的利用率成为了最受关注的应用。针对认知无线电在 TVWS 的应用，很多国家和地区都发布了相关管理政策，为推动认知无线电和认知无线网络的发展提供了政策环境。同时，大量的国际标准化组织也开始研究和制定相关的标准，以促进 TVWS 的认知无线电和认知无线网络的商用化。

1. 认知无线电和认知无线网络在 TVWS 的应用模型

TV 频段在各个国家主要位于甚高频 (Very High Frequency, VHF) 和特高频 (Ultra High Frequency, UHF)。随着数字电视技术的飞速发展，TV 频段的利用率越来越高，因此一些频段被“空闲”了出来，并得以重新利用。同时，TV 频段中，在特定的一段时间和特定的频段有可能处于空闲状态。电视白频谱 (TV White Space, TVWS) 即是指这些局部的、临时未被主业务占据的空闲频段。

相对于传统的未授权频段如 2.4GHz 和 5GHz 频段，这些白空间拥有良好的传播特性。TVWS 提供了数百兆的潜在可用频段，对无线服务供应商来说，这是一个令人鼓舞的机遇。利用相应的系统运行在这些未授权的频段，无疑会带来巨大的利益。

当前，利用 TVWS 的认知无线电和认知无线网络的潜在应用场景大致分为 7 种，如表 1-1 所列。

表 1-1 7 种潜在应用场景的定义

使用模式 (Usage Model, UM)	应用 场 景	描 述
1	大范围互连	高数据率固定站点组成的骨干网
2	通用 Grid Networks	接入情况复杂的固定站之间的互连
3	运输和物流	移动站点的后勤控制
4	手机互连	移动台的无缝连接
5	高速的车载宽带接入	高速移动的移动台组成的高数据率骨干网
6	办公室和家庭网络	高数据率小范围室内互连
7	紧急情况和公共安全	严苛环境下的高可靠性互连 (如地震、火灾现场等)

对比分析表 1-1 中应用场景 1~7 的异同如下：

(1) UM1 和 UM5 为高数据率骨干网，UM1 支持固定站，UM5 支持移动站；

- (2) 相比 UM1, UM2 支持大范围低数据率固定站;
- (3) UM3 同样为低数据率系统, 但为移动站;
- (4) UM4 针对移动站和手机用户;
- (5) UM5 针对高速运行的交通工具中的用户, 需要高移动性;
- (6) UM6 需求高数据率多媒体业务的短距离互连;
- (7) UM7 针对严苛条件下的网络互连, 所以安全性和延迟要求较高。

2. TVWS 的认知无线电管理政策

1) 美国 FCC

美国 FCC 由 2008 年开始着手制定关于 TVWS 频段的应用管理措施, 目前已经有一套较完善的管理制度, 并得到其他国家或组织的广泛认同及参考, 是较权威的一套管理规范。

(1) 可用频段。

① 所有的 TV 频段设备 (TV Band Devices, TVBD) 允许的可用频段范围为 512~608 MHz (信道 21~36) 和 614~698 MHz (信道 38~51)。

② 信道 37 的左右相邻信道不允许占用。

③ 可用频段 54~60MHz (信道 2), 76~88 MHz (信道 5~6), 174~216MHz (信道 7~13), 470~608 MHz (信道 14~36) and 614~698 MHz (信道 38~51) 仅可用于固定 TVBD 之间的通信。

(2) 系统架构与设备分类。

系统整体架构采用主从模式, 主设备控制从设备工作。设备依据功能和移动性分为 4 类:

① 固定设备: 安装在固定地点的设备。可直接或间接通过其他设备 (固定设备或模式二设备) 与地理数据库 (Geographical Database, GDB) 相连。户外天线高度可达 30m。可通过向其他固定或移动设备发送使能信号组建和管理一个网络。

② 模式二可移动设备: 个人便携式可移动设备。可直接或间接通过其他设备 (固定设备或模式二设备) 与数据库相连。可选择可用频段初始化一个网络或作为一个 TV 设备网络的一部分工作。可以向模式一可移动设备提供可用频段表。

③ 模式一可移动设备: 仅能在模式二设备的控制下工作。

④ 感知设备: 可以通过频谱感知技术判决寻找未被主用户占用的可用频段。

上述四类设备在主从网络架构下的连接关系如图 1-4 所示。

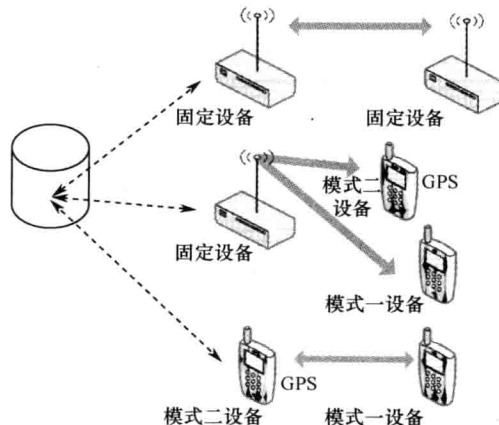


图 1-4 系统架构与设备分类