

高等院校信息与通信工程系列教材

Cognitive Software Defined Radio Systems:  
Principles and Sora-Based Experiments

# 认知软件无线电系统 ——原理与基于Sora的实验

赵友平 谭焜 著

Zhao Youping Tan Kun



清华大学出版社

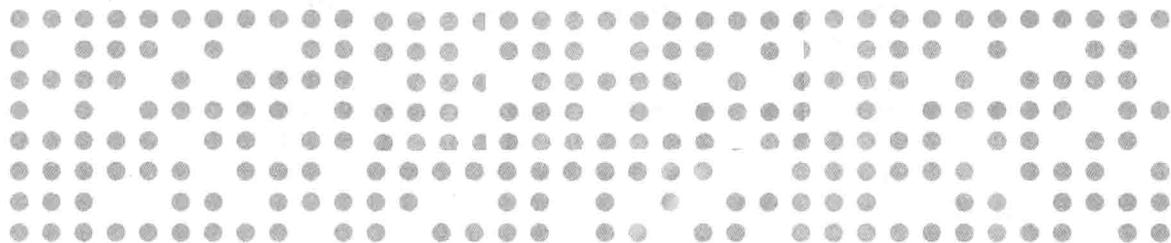
高等院校信息与通信工程系列教材

Cognitive Software Defined Radio Systems:  
Principles and Sora-Based Experiments

# 认知软件无线电系统 ——原理与基于Sora的实验

赵友平 谭焜 著

Zhao Youping Tan Kun



清华大学出版社

北京

## 内 容 简 介

认知无线电是无线通信的一个重要发展方向,可以看作是“头脑发达”、“会观察、会思考、会学习、会决策”的无线电,而软件无线电可以看作是“手脚灵便”、“服从指令”的无线电。认知软件无线电是软件无线电的智能化演进,既“头脑发达”又“手脚灵便”,能够更好地随机应变、自主学习优化以达到预期目标,更好地应对复杂的无线通信环境。认知软件无线电技术具有发展迅速、实践性强、交叉性强、应用广泛等特点,必将在新一代无线通信、应急通信、智能交通、物联网、航空航天、公安、国防、军事等诸多领域得到应用。

本书系统介绍认知软件无线电的基本概念与核心思想、认知机理、系统架构、性能评估方法、应用实例、标准化进程、面临的挑战与发展展望。在阐述认知软件无线电基本原理的同时,本书重点系统介绍了基于多核通用处理器的软件无线电实验平台——微软(亚洲)研究院开发的软件无线电系统 Sora,讲述了 Sora 的软硬件架构以及积木(Brick)编程模型,并提供了一系列可供读者选用的认知软件无线电实验课题及其参考设计、部分实验结果,以便于读者在“做”中“学”认知软件无线电技术。

本书既可作为高等院校通信、电子工程、计算机等专业本科生、研究生学习认知(软件)无线电技术的教材,或开展无线通信、移动通信、数字信号处理、认知(软件)无线电等相关课程的专题实验及课程设计的参考书,也可作为相关专业研究开发人员的培训教材或自学参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

认知软件无线电系统:原理与基于 Sora 的实验/赵友平,谭焜著.--北京:清华大学出版社,2014

高等院校信息与通信工程系列教材

ISBN 978-7-302-34686-9

I. ①认… II. ①赵… ②谭… III. ①无线电技术—高等学校—教材 IV. ①TN014

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第290861号

责任编辑:李 鹏

封面设计:常雪影

责任校对:时翠兰

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者:三河市君旺印装厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:170mm×240mm 印 张:9 字 数:170千字

版 次:2014年2月第1版 印 次:2014年2月第1次印刷

印 数:1~1500

定 价:29.00元

产品编号:053832-01

## 高等院校信息与通信工程系列教材编委会

主 编：陈俊亮

副 主 编：李乐民 张乃通 邬江兴

编 委 (排名不分先后)：

王 京 韦 岗 朱近康 朱世华

邬江兴 李乐民 李建东 张乃通

张中兆 张思东 严国萍 刘兴钊

陈俊亮 郑宝玉 范平志 孟洛明

袁东风 程时昕 雷维礼 谢希仁

# 出版说明

---

信息与通信工程学科是信息科学与技术的重要组成部分。改革开放以来,我国在发展通信系统与信息系统方面取得了长足的进步,形成了巨大的产业与市场,如我国的电话网络规模已位居世界首位,同时该领域的一些分支学科出现了为国际认可的技术创新,得到了迅猛的发展。为满足国家对高层次人才的迫切需求,当前国内大量高等学校设有信息与通信工程学科的院系或专业,培养大量的本科生与研究生。为适应学科知识不断更新的发展态势,他们迫切需要内容新颖又符合教改要求的教材和教学参考书。此外,大量的科研人员与工程技术人员也迫切需要学习、了解、掌握信息与通信工程学科领域的基础理论与较为系统的前沿专业知识。为了满足这些读者对高质量图书的渴求,清华大学出版社组织国内信息与通信工程国家级重点学科的教学与科研骨干以及本领域的一些知名学者、学术带头人编写了这套高等院校信息与通信工程系列教材。

该套教材以本科电子信息工程、通信工程专业的专业必修课程教材为主,同时包含一些反映学科发展前沿的本科选修课程教材和研究生教学用书。为了保证教材的出版质量,清华大学出版社不仅约请国内一流专家参与了丛书的选题规划,而且每本书在出版前都组织全国重点高校的骨干教师对作者的编写大纲和书稿进行了认真审核。

祝愿《高等院校信息与通信工程系列教材》为我国培养与造就信息与通信工程领域的高素质科技人才,推动信息科学的发展与进步作出贡献。

北京邮电大学  
陈俊亮

# 前 言

---

近 30 年来的发展实践表明,人们对无线通信尤其是移动通信的需求是无止境的,并且实际需求往往超出专家们的预测。在短短的 30 年时间里,公众蜂窝移动通信系统已经经历了从第一代到第四代翻天覆地般的历史演变,并正迈向第五代系统的征程:从模拟蜂窝移动通信系统演进到数字蜂窝移动通信系统,从单纯的窄带话音业务演进到丰富的宽带多媒体业务,手机的功能已经从“顺风耳”、“千里眼”逐渐发展成为人们的学习、生活中不可或缺的“助手”、“管家”、“保健医生”、“良师益友”……而无线电系统也从以硬件为主的硬件无线电逐渐演进到以软件为主的软件无线电(就像人类拥有了“灵巧手”),并将进一步演进到认知软件无线电(就像人类又拥有了“智慧脑”一样)。认知软件无线电不仅“头脑发达”,而且“手脚灵便”,能够更好地随机应变、自主学习优化以达到预期的目标,更好地应对极具挑战性的、愈加复杂多变的无线通信环境。

随着智能终端的普及和移动互联网的发展,基于移动信息化的需求已经渗透到各行各业之中。移动通信超常规的发展所蕴藏的创新空间和发展机会也是无限的。而认知软件无线电便是开发这个“无限”宝藏的重要“抓手”。本书将认知软件无线电技术的基本原理和实验测试相结合,以微软(亚洲)研究院开发的软件无线电系统 Sora 为例,深入浅出地讲述了认知无线电系统的认知机理和关键算法,给出了一系列基于 Sora 的认知软件无线电实验课题。借助近年来工程教育中所倡导的 CDIO 方法(即 Conceive 构思-Design 设计-Implement 实施-Operate 操作),使读者真正可以在“做”中“学”,并在创新实践的过程中深刻理解认知软件无线电技术的基本原理与核心思想。

本书的选题背景与意义:

- 适应许多高等院校为通信与信息系统、电子工程、计算机技术等专业的大学以及研究生开设“软件无线电”、“认知无线电”、“无线通信”、“移动通信”、“数字信号处理”等课程或开展相关课程设计、专题实验的需要。目前虽然有一些关于软件无线电或认知无线电的书籍,但仍缺乏将认知无线电与软件无线电的基本原理与实验环节相结合的书籍。
- 更新不少研究人员对“认知无线电”片面或传统的理解。有些研究人员对

认知无线电的理解比较狭隘片面,把认知无线电技术简单地等同于动态频谱接入(dynamic spectrum access, DSA)技术,而忽视了认知无线电的丰富内涵及其在诸多领域潜在的巨大应用价值。例如认知软件无线电有助于在各种具有挑战性的复杂无线环境下保障无线通信的通信质量(quality of service, QoS)或用户体验(quality of experience, QoE)、降低系统能耗与电磁辐射、实现异构网络的融合与优化、降低无线通信系统的成本等等。因此,本书的一个重要目标就是要更新人们对于认知无线电的认识和理解,扩展认知软件无线电技术的内涵。

- 配合高等院校的教学改革。认知无线通信领域的现有书籍多侧重概念、理论分析、算法研究或性能仿真,而非常缺乏能够支持大学生、研究生以及技术研发人员在“做”中“学”的新型教材,或课程设计、创新性实验研究的参考书。本书以微软(亚洲)研究院开发的先进的软件无线电实验平台 Sora 为基础,系统深入地介绍了认知软件无线电的基本原理、Sora 的系统构成、工作原理与关键技术,并给出了一系列基于 Sora 的认知软件无线电实验或课程设计。其中有一些实验或课程设计题目是开放式课题,旨在给学生更多的空间去发挥其创新力和想象力、激发其开展创新研究的兴趣。通过这些实验,读者可以在“做”中“学”,深刻理解认知软件无线电技术的基本原理和丰富内涵。
- 支持“大科学创新平台”的构建。认知无线通信系统与认知网络是未来信息技术的重要发展方向,具有基础性、前沿性、交叉性等特点,有望逐渐交叉融合发展成为一个“大科学创新平台”。以构建这个大科学创新平台为契机,可以形成新的学科团队,凝聚不同领域专家的力量,实现原始创新、集成创新或协同创新。本书针对认知软件无线电技术的发展现状、发展瓶颈,以及大规模应用时存在的问题,提出一些初步的想法,以期抛砖引玉、促进该研究领域同仁之间的交流与合作。

本书的特色:

- 兼顾认知(软件)无线电技术的基本原理与动手实验(实践),体现了“知”与“行”的统一,有助于我国高校“卓越工程师”和创新人才的培养。
- 提供一系列基于 Sora 的认知软件无线电实验或课程设计,开放式课题有利于激发学生的学习兴趣、培养学生的创新能力。
- 诠释认知软件无线电技术的丰富内涵、潜在应用和发展前景。

本书从结构上分为两大部分:第一部分是认知无线电与软件无线电的基本概念、基本原理、系统架构、Sora 的基本结构、设计思想、软件优化技术与模块化积木



编程模型(主要包括第 1、2、3、4 章);第二部分是认知软件无线电的潜在应用、标准化进程、实验或课程设计,以及挑战与展望(主要包括第 5、6、7 章)。

本书适用面广,不仅可作为高等院校通信、电子信息工程、计算机等专业的本科生、研究生学习认知(软件)无线电技术,进行专题实验或课程设计的教材、参考书,也可作为从事无线通信、移动通信、数字信号处理等研究开发领域的专业技术人员的培训教材或自学参考书。对于选用本书作为相关课程教材或参考书的教师用户,如果需要本书的配套课件、实验(课程设计)的配套软件,请与责任编辑或作者联系。

北京交通大学电子信息工程学院赵友平教授主要负责撰写本书第 1、2、5、6、7 章,微软(亚洲)研究院谭焜研究员主要负责撰写本书第 3、4 章。北京交通大学电子信息工程学院蒋锐、李金兴、朱海超、胡亦琦、肖世莹、邵其心等研究生提供了本书部分实验的参考设计或实验结果。

美国科学家 Joseph Mitola III 博士无疑对认知无线电与软件无线电的发展都做出了重大贡献,正是 Mitola 先生分别在 1990 年、1998 年间在国际会议上正式发表了关于软件无线电、认知无线电的论文,才使得软件无线电与认知无线电得到了学术界、产业界和政界(尤其是各国无线电频谱管理机构)更广泛的关注和更深入的研究,进而不断拓展软件无线电与认知无线电的内涵与应用。由此联想到根据有关统计,自 2010 年起,我国科技人员发表的 SCI(即科技引文索引)论文数量已跃居世界第二,而平均每篇论文的被引用次数还较低(低于世界平均值)。相比之下,Mitola 先生 1999 年发表在 IEEE Personal Communications 上的论文“Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal”的引用数量已经接近 4700 次(根据谷歌学术 Google Scholar 2013 年 9 月的统计数据),这就反映出了一个严峻而值得我国教育界与科技界深思的问题:我国不缺泛泛的论文,缺的是像 Mitola 先生那样能够提出新想法、新概念或者新问题的原创性论文(seminal paper),缺的是想象或联想的翅膀,缺的是充满激情、潜心思考而又持之以恒的探索精神,缺的是勇于打破传统、锐意创新开拓的思维习惯。这或许是我们从软件无线电与认知无线电的发展史以及 Mitola 先生身上得到的最大启迪。

在这部书稿完成之际,特别要感谢清华大学出版社编辑李鹏先生所给予的大力支持。赵友平教授的相关工作得到了国家自然科学基金重点项目(61132003)、教育部博士点基金项目(20120009130002)、中央高校基本业务费项目(2013JBZ002)和国家级教改项目“通信工程专业综合改革试点建设项目”(274021529)的资助。此外,赵友平教授还要特别感谢北京交通大学谈振辉教授和美国弗吉尼



亚理工大学 Jeffrey H. Reed 教授所给予的帮助和支持。

认知软件无线电技术正在日新月异地发展,并在不知不觉之中进入我们的生活,成为构建未来信息社会的关键技术。限于作者水平和写作时间,对于书中存在的错误或不足之处,恳请同行专家与读者给予批评指正,以便在今后的再版中不断完善与改进,我们将不胜感谢!

赵友平 谭 焜

2013年9月 北京

# 目 录

---

<b>第 1 章 认知无线电基础</b> .....	1
1.1 认知无线电基本概念 .....	2
1.2 认知无线电系统构成 .....	5
1.3 认知机理与认知算法 .....	8
1.3.1 人工智能.....	9
1.3.2 认知环(Cognition Cycle)的基本步骤 .....	9
1.4 认知无线电性能评估.....	14
思考题 .....	16
参考文献 .....	17
<b>第 2 章 软件无线电基础</b> .....	20
2.1 软件无线电概述.....	20
2.2 软件无线电系统架构.....	23
2.3 软件无线电系统设计与关键技术.....	24
2.3.1 软件无线电设计流程 .....	24
2.3.2 软件无线电的设计考虑 .....	25
2.3.3 软件无线电关键技术 .....	26
2.3.4 应用举例：基于多速率信号处理的 OFDM 收发信机设计 .....	29
2.3.5 基于多速率信号处理的 OFDM 系统同步解决方案.....	31
思考题 .....	31
参考文献 .....	33
<b>第 3 章 软件无线电实验平台 Sora</b> .....	35
3.1 Sora 简介 .....	35
3.2 Sora 软件架构与软件优化技术 .....	37
3.2.1 抽象无线电对象 .....	38

3.2.2	UMX 编程 .....	40
3.2.3	数据包反射 .....	45
3.2.4	Sora 独占线程 (Exclusive Threading) .....	46
3.2.5	优化 (Optimization) .....	49
3.2.6	小结 .....	55
	思考题 .....	57
	参考文献 .....	58
<b>第 4 章</b>	<b>软件无线电模块化编程模型 .....</b>	<b>60</b>
4.1	Sora 积木 (Brick) 编程模型 .....	60
4.2	积木编程模型 .....	61
4.2.1	积木 .....	61
4.2.2	端口和端口缓存队列 .....	63
4.2.3	积木构件接口 .....	64
4.2.4	上下文 (Context) .....	65
4.2.5	积木构件的实现 .....	66
4.3	积木编程实例 .....	66
4.3.1	信宿 .....	66
4.3.2	信源 .....	67
4.3.3	过滤器 .....	69
4.3.4	配置处理图 .....	69
4.3.5	处理图的执行 .....	71
4.3.6	小结 .....	72
4.4	积木编程模型的高级功能 .....	72
4.4.1	用户自定义接口 .....	72
4.4.2	控制内联优化 (Inline Optimization) .....	73
4.4.3	多线程支持 .....	76
	思考题 .....	77
	参考文献 .....	78
<b>第 5 章</b>	<b>认知无线电的标准化进程与应用 .....</b>	<b>79</b>
5.1	认知无线电标准化进程与潜在应用 .....	79
5.2	认知无线电在动态频谱接入与共享中的应用 .....	81
5.3	认知无线电在高速铁路移动通信中的应用 .....	86

---

思考题 .....	94
参考文献 .....	94
<b>第 6 章 基于 Sora 的认知软件无线电实验 .....</b>	<b>96</b>
6.1 基于 Sora 的频谱感知 .....	97
6.2 基于 Sora 的无线信道探测 .....	103
6.3 室内无线环境图的构建 .....	107
6.4 移动视频传输实验 .....	109
6.5 动态频谱接入与共享实验 .....	113
6.6 Sora 自动增益控制的设计与性能测试 .....	117
思考题(备选实验或课程设计课题) .....	122
参考文献 .....	123
<b>第 7 章 挑战与展望 .....</b>	<b>124</b>
7.1 认知软件无线电面临的挑战 .....	124
7.1.1 认知无线电的低成本实现 .....	124
7.1.2 认知无线电的安全性与可信性 .....	125
7.2 认知软件无线电的发展展望 .....	126
7.2.1 认知软件无线电技术在新一代移动通信系统中的重要 作用 .....	126
7.2.2 认知计算与通信(Cognitive Computing and Communications) .....	127
思考题 .....	128
参考文献 .....	130

# 第 1 章 认知无线电基础

---

“无线通信”自从 19 世纪末问世以来(以意大利发明家马可尼 Guglielmo Marconi 在 1895 年底实现了大约 2.4 公里距离的无线电报为标志<sup>[11]</sup>),经历了近 120 年的发展,尤其是近 30 年来移动通信技术的迅猛发展和广泛应用之后,逐渐出现了一些日益突出的问题亟待解决,例如:

(1) 无线频谱(带宽)无限需求与无线频谱资源有限供给之间的矛盾。

一方面人们对无线频谱(带宽)的需求与日俱增,普遍预测 2020 年无线通信移动数据的业务量是 2010 年移动数据业务量的 1000 倍以上,被业界称之为“千倍移动数据量”挑战问题(1000× Mobile Data Challenge)<sup>[13]</sup>;另一方面是绝大部分适于移动通信的频谱资源(尤其是 3GHz 以下的频段)都已划分完毕,缺乏可分配使用的频谱资源,而已经分配的频谱资源在时域或空域的实际利用率却很低,即普遍存在严重的频谱资源浪费现象。

(2) 通信性能(QoS)或用户体验(QoE)保障与复杂多变电磁环境之间的矛盾。

一方面在高速铁路、无人驾驶车辆(或无人机)、抢险救灾、(海陆空天)战场、地下空间、星空探索等特殊应用场景,电磁环境复杂多变、无线信道特性特殊或难以准确预知;另一方面是这些实际应用场景对保障通信性能(QoS)的要求又往往十分苛刻。

(3) “绿色”通信的迫切要求与信息高耗、低效供给之间的矛盾。

一方面是人们希望以最少的代价(能源消耗和等待时间)获得所需要的信息;另一方面是在信息供给链中(生成、处理、传输、获取等诸多环节)存在着严重的浪费,其中包括能源浪费、频谱资源浪费和时间浪费等。

以认知无线电(Cognitive Radio)技术为基础的未来智慧无线通信系统具有更精准全面及时的场景感知、更全面通畅的互联互通和更高层次的认知(智能),为解决上述诸多挑战性问题提供了有力的技术支撑。美国科学家 Joseph Mitola III 分别在 1990 和 1998 左右率先在学术会议上正式提出软件无线电和认知无线电的概念,并逐渐得到学术界、工业界和政界(尤其是无线电频谱管理机构)的积极响应与支持,进而更新了人们对于“无线通信”的传统认识。

这里,打个或许不甚恰当的比方来说明本书中所涉及的“认知无线电”、“软件

无线电”与“认知软件无线电”三个不同概念之间的关系：认知无线电可以看做是“头脑发达”、“会观察、会思考、会学习、会决策”的无线电（就像人类拥有了“智慧脑”）；而软件无线电是“手脚灵便”、“服从指令”的无线电（就像人类拥有了“灵巧手”）；认知软件无线电则是软件无线电的智能化演进，不仅“头脑发达”而且“手脚灵便”，能够更好地随机应变、自主学习优化以达到预期目标，更好地应对极具挑战性的、愈加复杂多变的无线通信环境。值得说明的是，从实现方法的角度来看，软件无线电为实现认知无线电提供了良好的平台和基础，普遍认为认知无线电通常是在软件无线电的基础上通过引入认知引擎(cognitive engine)来实现，但是，这并不是说认知无线电都必须基于软件无线电技术（参见[4]中第 11 章），正如“头脑发达”的人未必都需要“手脚灵便”一样。

本章首先对认知无线电这一前沿交叉研究热点进行概貌性介绍，阐述认知无线电技术的认知机理、系统架构、认知引擎设计以及认知无线电系统的性能评估方法等；然后在第 2、第 3、第 4 章分别对认知软件无线电的前身与重要基础-软件无线电技术、软件无线电平台（微软 Sora 系统）以及软件无线电模块化（Brick）编程方法进行进一步的介绍，第 5 章着重介绍认知无线电的典型应用和标准化进程。

## 1.1 认知无线电基本概念

认知无线电的概念最先是由被国际上誉为“软件无线电与认知无线电之父”（Father of software radio and cognitive radio）的 Joseph Mitola III 先生在 1998 年瑞典皇家工学院 KTH（Royal Institute of Technology in Stockholm）的一个研讨会上提出来，并随后于 1999 年发表在由 Joseph Mitola III 和 Gerald Q. Maguire 合写的一篇论文之中<sup>[1]</sup>。Mitola 先生将认知无线电技术描述为一种无线通信的新方法。尽管认知无线电的概念已经提出十多年了，目前国际上对认知无线电尚没有一个统一的定义，不同研究机构或国际组织基于不同的视角(perspective)或愿景(vision)，对认知无线电内涵与功能的描述并不完全一致<sup>[10]</sup>。维基百科中给出了一个较为全面客观的功能性描述如下：

In response to the operator's commands, the cognitive engine is capable of configuring radio-system parameters. These parameters include “waveform, protocol, operating frequency, and networking”. It functions as an autonomous unit in the communications environment, exchanging information about the environment with the networks it accesses and other cognitive radios (CRs). A CR “monitors its own performance continuously”, in addition to “reading the radio's outputs”; it then uses this information to “determine the RF

environment, channel conditions, link performance, etc.”, and adjusts the “radio’s settings to deliver the required quality of service subject to an appropriate combination of user requirements, operational limitations, and regulatory constraints”. [2]

自从认知无线电这一概念由 Joseph Mitola III 先生正式提出后,逐渐得到学术界、通信监管部门(例如美国联邦通信委员会 FCC,英国负责电视与通信业务的独立管理机构 Ofcom,我国的国家无线电管理委员会等政府部门)、通信协会与国际标准化组织(例如 IEEE、ITU、国际软件无线电论坛 SDR Forum 等)以及产业界的认可和支持。许多国际顶级学术期刊(例如 *Proceedings of the IEEE*, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 等)纷纷编辑出版了认知无线电专刊,与此同时,国际学术组织也针对认知无线电技术及其应用举办了很多专题研讨会。经过了 15 年时间的研究,认知无线电已发展为一项应用广泛(军事、应急通信和民用通信等)的重要使能技术(enabling technology)。它不仅可以提高频谱利用率,还可以提供具有更高的场景适应能力、更可靠和个性化的无线信息服务;不仅能够减少系统间的有害干扰,还可以促进网络间或节点间的协同或互通。认知无线电技术最终将推动无线通信终端乃至整个无线通信网络向智能化与软件化的方向发展,实现绿色高效通信,并保障通信质量(QoS)或用户体验(QoE)。认知无线电终将影响下一代无线设备和无线通信系统的能力与设计方法。目前,认知无线电已被广泛视为软件无线电的演进方向,将是一个完全可重构的无线收发信机,可以自主调整通信参数以适应网络和用户的需要。

值得说明的是,软件无线电(software radio 或 software defined radio,在软件无线电的发展史上,这两个英文术语之间有细微的差异)为认知无线电的实现提供了一个理想的平台,而认知软件无线电可以看做是软件无线电的智能化演进。这一演进的过程将是渐进的、长期的。预期的是通过加入越来越多的新特性,诸如全面的场景感知和学习优化能力,目前的软件无线电将逐渐演进为认知软件无线电。

近十年来,国内外科研机构与产业界对认知无线电技术正在进行积极地探索与研究,大多数工作仍处于理论架构研究、原型机开发或小规模测试阶段,其中具有代表性的研究项目是由美国国防部高级研究计划局(DARPA)资助的基于认知无线电的未来移动通信系统 XG (neXt Generation)项目及其后续研究项目 WNaN (Wireless Network after Next)。XG 及 WNaN 项目的主要目的是要提出并验证一系列新的无线通信系统设计理念与方法,为认知无线电的开发与实际应用做准备。其中 XG 项目采用的关键技术是动态频谱接入(dynamic spectrum access),XG 终端设备能够实时确定本地可用频谱,并在这些可用信道上进行通信,前提是不能对现有的非协作无线设备或用户(existing non-cooperative users)



造成干扰。XG 现场测试采用了三个主要的测试标准：①不造成有害干扰(cause no harm)；②组网与维护网络通信的能力(form and maintain connected networks)；③频谱利用率的提升(efficiently use spectrum)。论文<sup>[42]</sup>提供了详细的 XG 外场测试情况和所测得的性能指标。

当前,认知无线电的认知机理、基础理论及关键技术的研究仍是跨学科的前沿研究方向,具有重要的科学意义和现实意义。基于认知无线电技术的新一代通信系统的研究开发与实践应用符合我国以信息化带动工业化的发展战略,将有力推进工业化与信息化的融合,为我国社会经济可持续发展(早日进入“低碳信息社会”)、未来通信网络安全乃至国防安全奠定必要的技术基础。此外,开展认知无线电技术研究必将带动不同学科(例如无线通信、信号处理、电子技术、自动控制、计算机网络、智能交通、物流管理等)相关研究方向之间的合作与协同发展,极大地促进集成创新,加速形成具有自主知识产权的研究成果。本书运用理论与实验相结合的方法,系统介绍认知软件无线电技术的基本原理、体系架构、设计方法、测试与性能评估方法、实验平台和应用前景等,以期读者对认知软件无线电形成全方位的认识并为读者提供动手实践的实例。

表 1-1 给出了认知无线电知识结构一览表,可供读者在学习认知无线电技术时参考。

表 1-1 认知无线电知识结构一览表

知识单元	知识点
认知无线电的基本概念	认知无线电的基本概念、起源与发展历程
	认知无线电的认知机理、认知环
	认知引擎(主要构成、设计方法与关键算法)
	跨学科基础知识(信号处理、无线通信、电子电路、网络通信、计算机、软件工程、自动控制、人工智能等)
认知无线电的射频子系统与天线子系统设计	认知无线电射频子系统的性能要求、设计方法
	认知天线子系统(尤其是智能天线、认知多天线系统)基本算法
	微机电系统(MEMS)在认知无线电系统中的应用
认知引擎的设计方法	认知无线电的系统架构与认知引擎设计
	人工智能算法及其在认知无线电中的应用
	最优化方法及其在认知无线电中的应用
认知无线电的测试与性能评估	认知无线电的测试场景(集)、性能指标(集)、认知无线电性能测试与评估方法
认知无线电的应用与相关标准	IEEE 802.22, 802.11af 等动态频谱接入与共享(例如择机利用空闲的广播电视频道进行宽带无线数据通信)、应急通信等

## 1.2 认知无线电系统构成

本质上讲,与传统无线电不同的是,认知无线电是基于目标驱动的、能够自主学习并更好地适应不断变化的工作条件。认知无线电技术有望推动新一代无线设备乃至新一代无线通信系统的发展,成为频谱共享、公共安全、紧急抢险和军事行动等复杂电磁环境下的关键技术。

相应地,对应于不同的认知无线电应用和系统架构,认知无线电的系统构成会有或多或少的差异。认知无线电系统除了包括传统无线电设备所具有的射频子系统与天线子系统之外,最大的特点就是引入了“认知引擎”(Cognitive Engine)子系统。简单说,认知引擎就是认知无线电的智慧大脑,主要通过一系列软件(算法)来具体实现认知环(Cognition Cycle)所包含的诸多功能,例如场景感知、推理分析、学习优化、决策或计划、参数调整、性能反馈等。正是引入了认知引擎,认知无线电才真正成为一种“会思考”的无线电,借助于深刻、全面、精准的场景感知能力和自主学习优化能力,不断提高认知无线电的性能。

认知引擎是认知无线电的“大脑”或智能代理,认知引擎本质上是一个使无线电设备具备认知功能的(算法)软件包。认知引擎的实现方法较多,本节围绕一种通用的认知引擎架构,即基于“无线环境图”(Radio Environment Map-REM)的认知无线电系统来简要介绍认知无线电的认知机理,包括全面的场景感知(频谱感知、位置感知、信道感知等)、推理、决策、执行(系统参数调整)、基于反馈与性能分析进行自主优化学习的循环过程。进而,讨论一种基于无线环境图的认知无线电系统架构,分析比较不同的场景感知与学习优化算法。认知层次上可以分为节点层面的认知与网络层面的认知。

“无线环境图”的概念是由本书作者赵友平教授于2005年提出并发表在由美国认知无线电与软件无线电领域的著名科学家 Bruce A. Fette 博士所编著的 *Cognitive Radio Technology* 一书中(第11章)<sup>[4]</sup>。无线环境图可以看做是对复杂无线环境的一种数字化抽象,反映多维无线环境信息(如信道参数、无线信号或干扰的时域-空域-频域分布、网络拓扑等)。无线环境图的根本目的是为认知无线电设备或网络提供精准、全面的信息支撑和网络支撑,进而为多目标跨层(从应用层到网络层、链路层、物理层)乃至跨网(例如异构网络)优化提供支持。作为一种实现低成本、高性能认知无线通信系统的有效方法,无线环境图(REM)这一概念已得到了国内外同行以及国际组织如创新无线国际论坛(Wireless Innovation Forum,其前身是软件无线电国际论坛 Software Defined Radio Forum)的认同<sup>[6,9,10,15]</sup>,也得到了 IEEE、ITU-R 有关标准文件的采纳或引用<sup>[16]</sup>。欧盟第七框