

5G YU RENZHI WANGLUO DE RONGHE

5G 与认知网络的融合

崔翠梅 著

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

本书由国家自然科学基金项目 (No. 61471252)

江苏高校品牌专业建设工程资助项目 (TAPP, 项目负责人: 朱锡芳, 项目编号: PPZY2015B12)

常州工学院-“十三五”江苏省重点学科项目-电气工程重点建设学科

2016年度江苏省高校重点实验室建设项目-特种电机研究与应用重点建设实验室

常州市科技计划资助项目 (No. CJ20160054)

江苏高校文化创意协同创新中心重点项目 (No. XYN1505)

常州工学院自然科学基金重点项目 (No. YN1504)

江苏省建设系统科技项目 (2016ZD85) 资助出版

5G 与认知网络的融合

5G YU RENZHI WANGLUO DE RONGHE



崔翠梅 著

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

镇江

图书在版编目(CIP)数据

5G 与认知网络的融合 / 崔翠梅著. — 镇江 : 江苏大学出版社, 2017.10
ISBN 978-7-5684-0640-6

I. ①5… II. ①崔… III. ①无线电通信—移动通信—通信技术 IV. ①TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 258271 号

5G 与认知网络的融合

著 者/崔翠梅

责任编辑/王 晶 吴昌兴

出版发行/江苏大学出版社

地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编: 212003)

电 话/0511-84446464(传真)

网 址/<http://press.ujs.edu.cn>

排 版/镇江华翔票证印务有限公司

印 刷/丹阳市兴华印刷厂

开 本/890 mm×1 240mm 1/32

印 张/7.25

字 数/240 千字

版 次/2017 年 10 月第 1 版 2017 年 10 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-5684-0640-6

定 价/42.00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)

前 言

随着移动互联网与物联网的迅猛发展,个人无线设备的数量呈现指数级增长,人们对无线多媒体业务愈发青睐。据预测,到2020年,移动通信网络将面临1 000倍容量和100倍连接数增长的巨大挑战,而随之产生的频谱数据也将急剧增加,频谱大数据的存在已成事实。此外,由于频谱是有限的自然资源,如何在有限的频谱资源上满足上述爆炸式增长的宽带无线多媒体业务需求,已成为宽带无线移动通信技术发展面临的巨大挑战。所以,为解决频谱日益稀缺这一制约未来5G移动通信网络发展的主要瓶颈问题,如何更科学地规划和配置高动态频谱资源,通过频谱共享、频谱监控促进频谱节约利用和智能化动态资源分配以提升频谱利用效率和能量效率,已成为无线电管理工作的重要课题。而认知无线电(Cognitive Radio, CR)与认知无线网络(Cognitive Radio Networks, CRNs)的创新思想为解决这一难题提供了新思路。

认知无线电以灵活、智能、可重配置为显著特征,通过感知外界环境,并使用人工智能技术从环境中学习,有目的地实时改变某些操作参数,使其内部状态适应接收到的无线信号的统计变化,从而实现任何时间、任何地点的高可靠通信,以及对异构网络环境有限的无线频谱资源进行高效地利用。其核心思想是通过频谱感知和系统的智能学习能力,实现动态频谱分配和频谱共享。将认知无线电的思想和技术引入未来5G无线网络和系统中,使网络系统

中的节点具备认知能力和重新配置能力,能够自适应地改变网络传输参数来适应无线环境的动态变化,从而使无线网络动态频谱接入、分配与共享更加智能化。同时,它将推动未来 5G 无线移动通信数量级提高系统容量、传输速率、频谱效率和功率效率,以及超短时延的实现。因此,了解认知无线电的相关概念、原理,以及其在未来无线网络的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。

本书从科研和实际应用的角度出发,全面、系统地介绍了认知无线电、认知网络与 5G 关键技术的最新发展,以及相关研究工作。全书共分 10 章,系统地介绍了认知无线电、认知网络的概念,认知无线电的功能,包括频谱感知、频谱分析与频谱决策、频谱共享、频谱移动性管理;一些重要的研究主题,包括认知网络的协同频谱感知,认知网络的跨层设计,认知网络的路由协议,以及 CR 与 5G 的融合等。

在书稿完成之际,非常感谢我的导师们。首先,要感谢博士生导师苏州大学汪一鸣教授在科研路上的悉心指导和关怀,本书的科研内容多是在汪老师的指导下完成,她在认知无线电、认知网络方面提供了很多引人深思的意见。其次,要感谢博士后合作导师东南大学移动通信国家重点实验室金石教授提供的良好的科研环境和积极进取的学术氛围,以及他在机器学习与人工智能方面敏锐的学术洞察力给予我的启发和思考,这些为本书的顺利完成提供了有力的保障。最后,要感谢我在美国史蒂文斯理工学院学习期间的导师 Prof. Hong Man,感谢他在认知机会路由及 NS3 网络模拟方面给予的指导,让我接受了先进的科研理念;他们对科研工作的执着与热忱,拓展深化了我国际化的科研素养。

本书的部分资助来源于国家自然科学基金项目(No. 61471252),江苏高校品牌专业建设工程资助项目(TAPP: PPZY2015B129),“十三五”江苏省重点学科项目-电气工程重点建设学科,江苏省高校重点实验室建设项目-特种电机研究与应用重点建设实验室,常州市科技计划资助项目(No. CJ20160054),江苏高校文化创意协同创新中心重点项目(No. XYN1505),常州工学院自然科学基金重点项目(No. YN1504),以及江苏省建设系统科技项目(2016ZD85)。

本书的内容是结合作者近些年的科研成果编写,限于作者水平,加之时间仓促,书中难免存在不足之处,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,作者将不胜感激!

崔翠梅

2017年4月

目 录

第 1 章	认知无线网络概述	001
1.1	引 言	001
1.2	认知网络基本概念	004
1.2.1	认知无线电	004
1.2.2	认知无线网络	008
1.2.3	认知无线自组织网络(CRAHNs)	010
1.3	认知网络关键技术	012
1.3.1	频谱感知	012
1.3.2	频谱共享	014
1.3.3	跨层设计及优化	015
1.3.4	频谱管理	016
1.3.5	机会路由	018
1.4	认知网络的应用	021
1.4.1	军事通信中的应用	022
1.4.2	应急通信中的应用	024
1.4.3	公众网络中的应用	024
1.5	本章小结	028
第 2 章	频谱感知	029
2.1	引 言	029
2.2	频谱感知模型	030
2.3	频谱感知分类	031
2.4	基于发射机信号的感知	033
2.4.1	能量检测算法	034

- 2.4.2 两步检测算法 035
- 2.4.3 匹配滤波检测算法 036
- 2.4.4 循环平稳特征检测算法 036
- 2.5 基于接收机信号的检测 036
 - 2.5.1 基于干扰温度估计的检测 036
 - 2.5.2 基于接收机本振泄漏的检测 038
- 2.6 协同感知 039
 - 2.6.1 分布式多用户协同检测 039
 - 2.6.2 协作分集式协同检测 042
- 2.7 MAC 层及跨层感知 042
- 2.8 多维频谱感知 042
- 2.9 本章小结 045

第3章 基于中继的协同频谱感知 047

- 3.1 引言 047
- 3.2 协同感知的优化模型 048
 - 3.2.1 信道模型 048
 - 3.2.2 优化的系统模型 049
 - 3.2.3 路径损耗模型 053
 - 3.2.4 CRNs 系统协同性能指标 055
- 3.3 协同感知性能分析 056
 - 3.3.1 协同感知的信号多维可达性 056
 - 3.3.2 时间有效性分析 065
- 3.4 协同感知性能的优化 069
- 3.5 协同感知的蒙特卡洛仿真 070
- 3.6 最优判决门限的选择 072
- 3.7 主用户没有出现的感知 073
- 3.8 本章小结 075

第4章 双次协同频谱感知方案 076

4.1 引 言 076

4.2 基于中继的双次协同感知原理 076

4.2.1 系统模型 076

4.2.2 第一次(单次)协同感知原理 078

4.2.3 第二次协同感知原理 079

4.3 双次协同性能分析与评估 080

4.4 判决准则的优化 083

4.5 能量感知阈值的优化 085

4.6 协同认知用户数的优化 086

4.7 本章小结 088

第5章 双次协同频谱感知时间敏捷性 090

5.1 引 言 090

5.2 DV-TDMA 优化的感知调度机制 092

5.3 DV-TDMA 时间敏捷性 093

5.4 感知时间敏捷性的优化 096

5.5 感知时间敏捷性评估分析 099

5.6 本章小结 106

第6章 机会频谱接入的跨层优化 107

6.1 引 言 107

6.2 MAC 层帧结构的优化 108

6.2.1 主用户活动模型 108

6.2.2 平均感知时间的优化 109

6.2.3 CRNs 吞吐量 110

6.2.4 CRNs 吞吐量优化 112

6.3 性能仿真分析 115

6.4 本章小结 119

第7章 基于频谱感知的机会认知路由协议 121

7.1 引言 121

7.2 系统模型 124

7.3 DCSS-OCR 机会认知路由协议 126

7.3.1 协议工作过程 126

7.3.2 信道感知 129

7.3.3 前传节点选择 131

7.3.4 最优信道选择 135

7.3.5 最优路径选择 136

7.4 机会认知路由度量 137

7.4.1 路由接入机会 138

7.4.2 路由传输延迟 138

7.5 本章小结 143

第8章 DCSS-OCR 机会认知路由协议性能分析及优化 145

8.1 引言 145

8.2 路由度量的优化 146

8.3 路由性能评估 149

8.3.1 DCSS-OCR 的验证 150

8.3.2 DCSS-OCR 期望链路路由机会和平均传输延迟 准确性分析 153

8.3.3 DCSS-OCR:不同参数对传输延迟性能的影响 155

8.3.4 DCSS-OCR:路由机会的性能分析 159

8.4 本章小结 160

第9章 基于认知无线电的5G网络 162

9.1 引言 162

9.2 5G 概念 166

9.2.1 移动通信的演进 166

9.2.2	5G 无线关键技术	170
9.2.3	5G 网络关键技术	177
9.3	5G 频谱研究动态	181
9.3.1	5G 频谱国内外研究现状	181
9.3.2	5G 频谱共享国内外研究现状	183
9.4	基于 CR 的 5G	185
9.4.1	5G 与 CR 的相似性	185
9.4.2	5G 终端是 CR 终端	185
9.4.3	WISDOM/5G 的最佳实现:CR 技术	186
9.4.4	基于 CR 的 5G 面临挑战	188
9.5	本章小节	189
第 10 章 挑战与展望 190		
10.1	CR 面临的挑战	190
10.2	CR 的发展展望	192
10.2.1	CR 在 5G 网络中的重要作用	192
10.2.2	认知计算与认知无线通信	193
参考文献 194		
附录 相关术语及缩略语 217		

第1章 认知无线网络概述

随着无线通信技术的飞速发展,以及未来 5G 网络结构的复杂性,具有不同接入技术的网络互融共存,用户端的业务需求更加多元化,如何在复杂的异构网络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可行思路,同时也为提高无线资源的利用率和频谱效率提供了有效的解决方案。本章将介绍认知无线网络的研究背景和意义,以及当前该领域内与本书相关工作的国内外研究进展和研究成果;认知无线网络的相关概念及其相关技术;认知无线网络路由设计的研究进展及其面临的技术挑战;认知网络应用领域及前景。

1.1 引言

随着第四代无线移动通信系统(4G)标准的日益成熟及全球正在进行的 4G 网络的大规模部署,移动互联网进入高速发展期。平板电脑和智能电话等移动端的持续普及促进了新型无线多媒体业务的不断涌现,全球范围内移动通信用户数迅猛增长,加之物联网产业持续蓬勃发展衍生出海量的超越人与人链接的无线业务需求,都对无线数据传输能力提出了更高的要求。据预测,到 2020 年,移动通信网络将面临 1 000 倍容量和 100 倍连接数增长的巨大挑战,同时还需满足用户友好接入、网络本身灵活升级部署和低成本运营维护等需求。面向 2020 年之后的人类信息社会需求的 5G 宽带移动通信系统将成为一个多业务、多技术融合的异构网络系

统,通过技术的不断创新,满足未来广泛的数据业务及连接数的发展需求,并进一步提升用户的体验^[1,2]。

为了实现上述 5G 网络数据流量大、用户规模大、数据速率高、永远在线的需求目标,仅靠技术进步带来的增益是有限的,还需要探求更多的无线通信频段,即解决电磁频谱日益稀缺这一制约 5G 网络发展的主要瓶颈问题,以满足“以用户为中心”的未来移动通信要求。同时,由于未来 5G 网络具有广域、超密集、高动态,以及多样化的复杂异构等特点,单纯依靠增加公共通信频谱资源来解决问题的传统静态资源分配方式已无法满足 5G 发展的需要。为了进一步满足未来 5G 网络高速化、灵活化、智慧化需求,应对未来移动信息社会难以预计的快速变化^[3],如何更科学地规划和配置高动态频谱资源,通过频谱共享、频谱监控促进频谱节约利用和智能化动态资源分配以提升频谱利用效率和能量效率,已成为无线电管理工作的重要课题。而建立在认知科学、计算科学、信息与控制及无线通信等理论基础之上的认知无线电概念的引出,以及认知无线网络、动态频谱接入(Dynamic Spectrum Access, DSA)和智能频谱分配的提出,正是对这一领域传统理念和技术创新和挑战。

认知无线电研究是随着人们的认识不断深化逐渐展开的,早期主要集中在若干个认知用户(Cognitive Radio User, 又称次用户: Secondary Users, SUs)如何进行频谱感知、频谱接入和频谱共享的探讨上,而当多个授权用户(License User, 又称主用户: Primary Users, PUs)和认知用户分别组成网络之后,人们意识到授权无线网络和认知无线网络本身的网络拓扑与架构,以及这两类网络之间的纵横交错的复杂关系都需要深入研究。认知无线网络是认知无线电的网络化,即采用认知无线电技术的通信节点可以独立组网,或者与现有无线路网(移动蜂窝网络、无线局域网、无线 Ad hoc 自组织网等)共同组网。认知无线网络并没有授权使用某个特定的频段,而是智能伺机接入未被使用的空闲频段。因此,它具有高度的智能性,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,并根据其状态进行相应的学习、决策和响应,从而自适应

网络环境的动态变化。

未来 5G 网络的发展将使城市区域电磁传播环境变得极为复杂,电磁波传输密集、遮挡、多径反射、同频干扰等现象非常严重,使得传统的大距离固定站监测手段难以快速完成各项精确的监测任务。对一些需要保护的重点区域难以被覆盖,对各种弱功率信号、突发的干扰信号、短持续信号等难以截获和跟踪定位,这对于无线电频谱的准确监测是一个很大的挑战。其次,未来 5G 网络中所监测的频谱数据将呈现出大数据特征,主要表现在:时间-频率-空间等多维度的频谱数据量巨大(Volume);网络环境的高动态、高容量蕴含高速频谱数据流(Velocity);频谱数据来源和类型呈现出多样性(Variety);干扰、欺骗和虚假数据造成的不真实性(Veracity);面向频谱高效利用,频谱秩序管理等需求的高价值(Value)等。如果对所需感知的海量频谱大数据仅采用普通的协同感知方法,不仅频谱感知准确性和时间敏捷性等性能不会明显改善,而且会使信息处理复杂度及感知成本大幅增加。此外,频谱动态接入带来的节点可用信道随时间和空间变化的特性,使得认知无线网络路由问题呈现出不同于传统无线网络的特点,路由研究成为认知无线网络研究的一个重要方面。

因此,未来 5G 网络应该具有自学习和推理预测能力,其动态频谱资源分配算法和路由算法应适应复杂异构和动态变化的网络环境,优化频谱与功率分配,实现高效利用网络资源的目标。但目前的 5G 网络尚未具备这样的学习能力和自适应性,相关研究工作也才刚刚开始,加上目前缺乏成熟、统一的 5G 网络实验平台或原型系统可供借鉴,在研究中通常要对涉及的场景进行设定,该设定对资源分配算法和路由策略的形成、优劣的评判、标准的制定都有很大影响。以上种种都表明对未来 5G 网络频谱资源分配与管理,以及机会路由的研究既具有必要性,又充满挑战性。

1.2 认知网络基本概念

1.2.1 认知无线电

认知无线电和认知无线网络被认为是提高频谱利用率和频谱效率,解决当前频谱资源紧张问题的关键技术。

随着无线通信业务的不断升级需要更多的带宽来保证,这就对无线频谱资源使用提出了更多要求,导致频谱资源的紧缺。根据美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)对 3GHz ~ 6GHz 频谱资源使用的测量结果,发现在任意时间任意地点都有大量已授权频谱处于空闲状态。在目前的固定分配方法下,频谱资源的利用存在高度的不均衡性,一些授权频段的占用非常拥挤,而另一些授权频段则非常空闲^[1]。即使主用户在某一时间、地点没有使用其授权频谱,其他非主用户也不能使用该频段,从而导致频谱资源在时间上和空间上的浪费。这一事实说明频谱资源的“紧缺”并不是因为物理上的可用资源短缺,而是由不合理的频谱管理分配政策造成的。

为了解决上述矛盾,认知无线电^[4]的概念应运而生,并引起了业界的极大关注。CR 的基本思想:通过不间断的监视和检测目标频段,在不对主用户造成干扰的前提下,认知用户可以“伺机”接入这些空闲频谱。而一旦主用户需要使用该频段,认知用户必须立刻采取退避措施,退出该频段,以避免对主用户产生干扰。认知无线电技术通过对授权频谱在空间、时间、频率等多维度上进行见缝插针的“二次利用”,可以有效解决有限的频谱资源的动态使用问题,极大提高频谱资源复用率。

认知无线电的概念是 1999 年由被誉为“软件无线电之父”的 Joseph Mitola 博士在其发表的一篇论文^[4]中首次提出的,但发展至今,其研究和应用都不再局限于最初的范畴,不同的研究者从不同的角度给出认知无线电的定义和内涵。Mitola 于 2000 在他的博士论文^[5]中进一步阐述了 CR 定义:“CR 这个术语确定了一个观点,

即无线个人数字助理和相关的网络具有对于无线资源和相关的计算机与计算机之间通信足够的计算智能,包括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”。这一较为理想化的定义中,人工智能扮演了重要的角色,但这与现在的技术水平存在一定的差距。此外,CR 认知功能的实现主要体现在应用层或更高层的学习和推理能力,以及相应的具有认知功能的物理层和链路层体系结构的有效支撑。弗吉尼亚技术中心指出^[6] CR 不一定需要软件定义无线电 (Software Define Radio, SDR) 的支撑,对传统无线电系统的物理层 (Physical Layer, PHY) 和媒体接入控制 (Media Access Control, MAC) 子层的演进过程,采用基于遗传算法的生物启发认知模型建模,更适用于需快速部署的灾难通信系统。但他们仅考虑了单个 CR 引擎节点的操作,没有涉及引擎节点在 CR 网络中的行为。

2004 年 5 月, FCC 正式发布的 NPRM (Notice of Proposed Rule Making)^[7] 中给出了 CR 的相对狭义的定义:“CR 是指能通过与工作的环境交互,动态改变其发射机参数的无线电设备,具有环境感知和传输参数自我修改的功能。CR 的主体可能是 SDR,但对 CR 设备而言,不一定必须具有软件或现场可编程的要求。”同时,开放电视广播频段作为基于认知无线电技术研究的实验频段,为基于认知无线电的研究工作提供了有利条件,促进了认知无线电技术的快速发展。

2004 年 11 月,美国电气电子工程师学会 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) 正式成立 IEEE 802.22 工作组,它是世界上第一个基于认知无线电技术的空中接口标准化组织,其目标是开发和建立一套基于 CR 技术的无线区域网 (Wireless Regional Area Network, WRAN) 空中接口的物理层和媒体接入控制层标准。该 WRAN 系统作为非主用户系统以一种“伺机”的方式接入到 VHF 和 UHF (54MHz ~ 862MHz, 扩展频率范围 47MHz ~ 910MHz) 广播电视的频段,在不对广播电视用户造成干扰的前提下,为农村和偏远地区,以及人口密度低、服务困难的地方,实现无

线宽带接入,充分提高频谱利用率。

其他的标准化组织也积极参与到 CR 技术的研究和标准化进程当中,2004 年 12 月成立的 802.16h 工作组^[8],致力于使 IEEE.16 系列标准可以在免授权频段得到应用,并降低对其他基于 IEEE.16 免授权频段服务用户的干扰。2005 年成立的 IEEE P1900 标准组致力于进行与下一代无线通信技术和高级频谱管理技术相关的电磁兼容研究^[9]。该工作组制定的 IEEE 1900.1^[10]将 CR 定义为“一个能够感知外部环境的智能无线通信系统,能从环境中学习,并根据环境的动态变化调整其内部状态,以获得预期的目的。”此观点认为 CR 可以采用人工智能技术,也可以采用一些简单的控制机制来实现。此外,国际电信联盟(International Telecommunications Union, ITU)和软件无线电论坛(SDR Forum)等组织也成立了 CR 工作组或者通过了发展 CR 的议案。

学术界同样认识到了 CR 的巨大潜力,2005 年 2 月,Simon Haykin 在关于认知无线电的综述性文章^[11]中提出:“CR 是一种智能的无线通信系统,它能够感知外界环境并且利用人工智能技术从环境中学习,通过实时改变某些工作参数,使其内部状态适应它所接收到的无线信号的统计性变化,从而实现随时随地高可靠性的无线通信,以及对频谱资源的有效利用。”根据这一定义,他还从信号处理的角度总结了 CR 技术的三个关键问题:无线环境分析、信道状态估计与预测建模、发射功率控制与动态频谱管理。他针对这些关键问题提出了一些解决方法和可能的研究方向,给出了这三个关键问题构成的认知环模型,如图 1-1 所示。

由认知无线电的定义可以看出,它应当具备的两个重要特征是认知能力和重配置能力^[12]。认知能力是指认知无线电能够实时与周围环境进行交互,以探知特定时间和空间的空闲频谱资源,调整适合的通信参数以自适应无线射频环境。认知能力的实现涉及频谱感知、频谱分析和频谱决策三个基本任务。在频谱感知任务中,认知无线电监视可用频带,捕获频谱信息,检测可用频谱空穴。在频谱分析任务中,分析频谱空穴的相关特性。在频谱决策任务