

未来无线网络
WEILAI WUXIAN TONGXIN WANGLUO

认知无线电原理与应用

RENZHI WUXIANDIAN YUANLI YU YINGYONG

谢刚 / 著





未来无线网络

认知无线电原理与应用

谢 刚 著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

随着无线通信的迅猛发展,有限的频谱资源变得越来越紧张,另外传统的静态无线频谱资源分配策略也导致频谱利用率低下。提高频谱效率是第五代移动通信系统亟待解决的重要问题,认知无线电作为解决上述问题的关键技术得到了越来越广泛的关注。

本书分五部分系统阐述了认知无线电的原理与技术,第一部分介绍了认知无线电的概述。第二部分介绍了若干数学工具和下一代无线通信系统的关键技术。第三部分介绍了认知无线电的频谱感知技术,包括概述与基础、新型单节点频谱感知技术和多节点协作频谱感知技术。第四部分介绍动态频谱接入技术,包括基于干扰温度限制的分布式频谱共享、自适应资源分配、基于拍卖理论的动态频谱接入技术和多天线系统动态频谱接入技术。第五部分介绍了认知无线电技术的应用。

本书内容丰富,可以作为研究第五代移动通信、认知无线电、认知网络的专业技术人员和研究生的教材和参考书,也可以从事该方向的技术人员的参考资料

图书在版编目 (CIP) 数据

认知无线电原理与应用 / 谢刚著. -- 北京: 北京邮电大学出版社, 2016. 11
ISBN 978-7-5635-4966-5

I. ①认… II. ①谢… III. ①移动无线通信 IV. ①TN924

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 288481 号

书 名: 认知无线电原理与应用

著作责任者: 谢 刚 著

责任编辑: 张珊珊

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

发行部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫丰华彩印有限公司

开 本: 720 mm×1 000 mm 1/16

印 张: 14

字 数: 280 千字

版 次: 2016 年 11 月第 1 版 2016 年 11 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-4966-5

定 价: 35.00 元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

丛书总序

近年来,智能手机、平板电脑、移动软件商城、无线移动硬盘、无线显示器、无线互联电脑等的出现开启了无线互联的新时代,无线数据流量和信令对现有无线通信网络带来了前所未有的冲击,容量需求呈非线性爆炸式增长。伴随着无线通信需求的不断增长,用户希望能够享受更加丰富的业务和更好的用户体验,这就要求未来的无线通信网络能够提供宽带、高速、大容量的无线接入,提高频谱利用率、能量效率及用户服务质量,降低成本和资费。基于此,本丛书着眼于未来无线通信网络中各种创新技术的理论和应用,旨在给广大读者带来一些思考和帮助。

本丛书首批计划出版五本书,其中《无线泛在网络的移动性管理技术》一书详细介绍无线泛在网络环境中移动性管理技术面临的问题与挑战,为读者提供了移动性管理技术的研究现状及未来的发展方向。《认知无线电与认知网络》一书主要阐述认知无线电的概念、频谱感知、频谱共享等,向读者介绍并示范如何利用凸函数最优化、博弈论等数学理论来进行研究。环境感知、机器学习和智能决策是认知网络区别于其他通信网络的三大特征,《认知无线网络中的人工智能》一书关注的是认知网络的学习能力,重点讨论了人工神经网络、启发式算法和增强学习等算法如何用于解决认知网络中的频谱检测、功率分配、参数调整等具体问题。《宽带移动通信系统的网络自组织(SON)技术》一书通过系统讲解IMT-Advanced系统的SON技术,详细分析了SON系统方案、协议流程、新网络测量方案、关键技术解决方案和算法等。《绿色通信网络技术》一书重点介绍多网共存的绿色通信网络中的相关技术,如绿色通信网络概述、异构网络与绿色通信、FPGA与绿色通信等。

从最早的马可尼越洋电报到现在的移动通信,从第一代移动通信到现在第四代移动通信的二十年中,无线通信已经成为整个通信领域中的重要组成部分,是具有全球规模的最重要的产业之一。当前无线移动通

信的持续发展面临着巨大的挑战,也带来了广阔的创新空间。我们衷心感谢国家新闻出版总署的大力支持,将“丛书”列入“十二五”国家重点图书出版规划项目,并给予国家出版基金的支持,衷心希望本丛书的出版能为我国无线通信产业的发展添砖加瓦。本丛书的作者主要是年轻有为的青年学者,他们活跃在教学和科研的第一线,本丛书凝聚了他们的心血和潜心研究的成果,希望广大读者给予支持和指教。

孔红

前 言

无线频谱作为一种有限的、不可再生的资源，在无线技术越来越发达、无线应用越来越广泛的今天，已经变得极为宝贵。目前，各国的频谱分配政策和方法大同小异，普遍采用所谓“静态分配”的方式：将频谱划分为不相互重叠的多个部分，分别分配给不同的使用者，称之为授权频段，而其使用者被称为授权用户，对授权频段具有独占权，其对授权频段的利用具有排他性。但经过几十年的发展，这些频谱资源的使用情况却令人失望。提高频谱效率是第五代移动通信系统亟待解决的重要问题，认知无线电作为解决上述问题的关键技术得到了越来越广泛的关注。认知无线电系统采用频谱感知、干扰避让、资源分配等技术接入授权频段，并避免引入干扰，从而在特定的频谱范围内实现共存，提高频谱利用率。在认知无线电系统中，为了实现预期的智能自适应功能，必须采用多种新技术和新方法。

鉴于此，本书介绍了认知无线电与认知网络的新技术和新方法。第一部分介绍了认知无线电的概述。第二部分介绍了若干数学工具和下一代无线通信系统的关键技术。第三部分介绍了认知无线电的频谱感知技术，包括概述与基础、新型单节点频谱感知技术和多节点协作频谱感知技术。第四部分介绍动态频谱接入技术，包括基于干扰温度限制的分布式频谱共享、自适应资源分配、基于拍卖理论的动态频谱接入技术和多天线系统动态频谱接入技术。第五部分介绍了认知无线电技术的应用。感谢为本书编写做出贡献的几位博士研究生，他们是曾令康，张然然，毛峻岭和邓潘亮。

还要感谢读者的阅读和帮助，希望更多的有志之士投入到伟大的无线通信的理论研究和工程实践中。

限于作者水平，恳请读者批评指正。

目 录

第一部分 绪论

第 1 章 认知无线电概述	3
1.1 认知无线电的产生背景及意义	3
1.2 认知无线电的发展与标准化工作	5
1.3 认知无线电关键技术研究现状	8
参考文献	11

第二部分 相关基础知识

第 2 章 若干数学工具	23
2.1 最优化方法	23
2.1.1 最优性条件	24
2.1.2 对偶理论	25
2.1.3 无约束最优化方法	28
2.1.4 约束最优化方法	32
参考文献	36
2.2 博弈论	36
2.2.1 引言	36
2.2.2 非合作博弈	37
2.2.3 合作博弈	43

2.2.4 博弈论在认知无线电中的应用	46
参考文献	46
第3章 下一代无线通信系统关键技术	50
3.1 MIMO	50
3.1.1 单用户 MIMO 系统	50
3.1.2 多用户 MIMO 系统	52
3.2 OFDM	55
3.2.1 点对点 OFDM 系统	56
3.2.2 多用户 OFDM 系统	57
3.2.3 多小区 OFDMA 系统	57
3.3 资源分配	59
参考文献	60

第三部分 频谱感知

第4章 频谱感知概述及基础	65
4.1 频谱感知技术简述	65
4.2 频谱感知基础知识	67
4.2.1 Neyman-Pearson 定理	68
4.2.2 贝叶斯风险和最小错误概率	68
4.3 经典单节点频谱感知技术	70
4.3.1 匹配滤波器检测	70
4.3.2 能量检测	71
4.3.3 循环平稳特征检测	72
参考文献	74
第5章 新型单节点频谱感知技术	76
5.1 自适应单带频谱感知技术	76
5.1.1 自适应单带频谱感知技术 1	78
5.1.2 自适应单带频谱感知技术 2	79

5.2 基于信息论准则的多带频谱感知技术	83
5.2.1 基于信息论准则的多带频谱感知技术 1	84
5.2.2 基于信息论准则的多带频谱感知技术 2	87
5.3 基于广义似然比检验的多带频谱感知技术	93
5.4 基于自适应阵列的多带频谱感知技术	100
参考文献	104
第 6 章 多节点协作频谱感知技术	106
6.1 集中式协作频谱感知	106
6.2 分布式协作频谱感知	107
6.3 软协作 VS 硬协作频谱感知	108
6.4 最大化信道容量的协作感知技术	115
6.5 频谱感知面临的挑战	125
参考文献	126

第四部分 动态频谱接入技术

第 7 章 基于干扰温度限制的分布式频谱共享	133
7.1 引言	133
7.2 分布式 CR 系统模型	135
7.2.1 系统描述	135
7.2.2 目标函数	136
7.3 非合作功率博弈	136
7.3.1 放缩博弈	137
7.3.2 ITL 受限的博弈	139
7.3.3 分布式频谱共享方案	140
7.3.4 迭代的必要性	141
7.4 基于部分 CSI 的非合作博弈	141
7.5 仿真分析	142
7.6 小结	145
附录 定理 7.4 的证明	145
参考文献	146

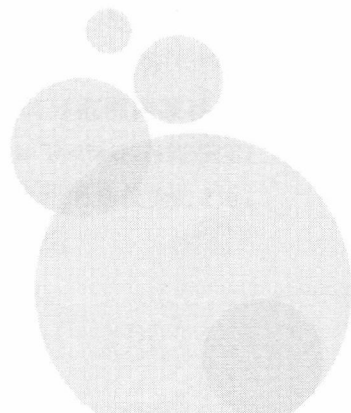
第 8 章 认知无线电系统中的自适应资源分配	149
8.1 引言	149
8.2 CR 系统下行链路中的最优自适应分配算法	151
8.2.1 系统模型	151
8.2.2 对授权用户的干扰限制分析	152
8.2.3 最优自适应资源分配算法	153
8.2.4 仿真结果	158
8.2.5 结论	161
8.3 最大化信息传输速率的下行 CR 系统资源分配算法	161
8.3.1 优化问题描述	161
8.3.2 最优的子载波分配方案	163
8.3.3 功率和比特加载方案	164
8.3.4 仿真结果	168
8.3.5 结论	169
8.4 最小化发射功率的下行 CR 系统资源分配算法	170
8.4.1 系统模型	170
8.4.2 WGSa 算法	172
8.4.3 DIPa 算法	174
8.4.4 仿真结果	177
8.4.5 结论	178
8.5 小结	178
参考文献	179
第 9 章 基于拍卖理论的动态频谱接入技术	181
9.1 基于拍卖理论的无线信道分配	181
9.2 基于多赢家拍卖的认知无线电系统	184
9.3 认知无线网络中基于重复拍卖的频谱接入技术	187
参考文献	189

第 10 章 多天线系统动态频谱接入技术	192
10.1 基于理想信道信息的 MIMO 认知无线电系统	192
10.2 基于感知的 MIMO 认知无线电系统	195
10.3 感知时间受限的 MIMO 认知无线电系统	198
参考文献	199

第五部分 认知无线电技术的应用

第 11 章 认知无线电的标准进展	203
11.1 802.22	203
11.2 802.11h	204
11.3 802.11y	206
参考文献	207
第 12 章 认知无线电技术在军事中的应用	208
12.1 频谱管理	208
12.2 复杂电磁环境监控	209
12.3 抗干扰通信	210
参考文献	210

第一部分
绪 论



第 1 章 认知无线电概述

1.1 认知无线电的产生背景及意义

无线通信^[1-3]的便捷性、及时性和移动性使得其无论在日常生活领域还是国防安全等各个方面,无疑都成为通信及数据传输的首选方案之一。面对这种巨大的需求,无线通信技术及其应用几十年来取得了极大的进步和成就:办公楼、酒店、学校等热点区域已经部署了众多 WLAN(Wireless Local Area Network)热点;蓝牙等短距通信技术可以方便地连接不同的设备;卫星通信则满足了超远距离通信的需求;个人移动通信的需求最为迫切,发展也最为迅猛。无线蜂窝系统经历三代革命性的技术革新^[4-8]后,据统计 2010 年底全球手机用户的数量已经高达 52.8 亿^[9],而在亚洲等地区用户量仍在不断增长。与此同时后续的无线通信技术如 LTE 和 LTE-A^[10,11]等也得到深入的研究,并形成了相应的标准,大规模部署商用在即。以上通信技术虽然各具特色,其目标却完全一致:任何时间和地点,提供高速的无线连接和数据服务。

无论何种技术,都无一例外地以无线频谱为支撑。无线频谱作为一种有限的、不可再生的资源,在无线技术越来越发达、无线应用越来越广泛的今天,已经变得极为宝贵。目前,各国的频谱分配政策和方法大同小异,普遍采用所谓“静态分配”的方式:将频谱划分为不相互重叠的多个部分,分别分配给不同的使用者,称为授权频段,而其使用者被称为授权用户,对授权频段具有独占权,其对授权频段的利用具有排他性。但经过几十年的发展,这些频谱资源的使用情况却令人失望:美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)的调查报告^[12,13]显示,在不同的地理位置和时间区间内,授权频段利用率在 15%~85% 范围内波动;美国国家无线电网络研究实验床(National Radio Network Research Testbed, NRNRT)测试项目^[14]则显示,6 个测试地点 30 Hz~3 GHz 的频谱资源平均利用率仅为 5.2%;而世界各地的学术文献^[15-17]也都证明了频谱资源利用不足这一现实。

一方面,为了充分地利用授权频段,在有限的频谱资源上支持更多的用户^[18],人们开发了多种多址方式,如频分多址(Frequency Division Multiple Access, FDMA)、时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)、码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)以及空分多址(Space Division Multiple Access, SDMA)等。另一方面,在调制、编码以及多入多出(Multiple Input and Multiple Output, MIMO)等技术上也投入很大的力量进行研究,以尽可能地提高频谱利用率^[19]。

即便进行了以上的诸多努力,但由于香农定律^[20]和频谱分配方式的限制,难以从根本上解决频谱资源紧张的问题,授权频段的利用率无疑仍然令人失望,与初衷相违背。但是,这一状况不仅提示我们应当加强对授权频段的充分利用,也为急迫需求频谱资源的各种无线技术和应用提供了一线新的希望。

现行的频谱资源分配方式也给出了一些无须授权就可使用的频段,比如工业、科学和医用(Industrial, Scientific and Medical, ISM)频段,只要符合一定的标准,设备可以随意访问。在这一频段上,Wi-Fi、蓝牙以及其他一些无线技术实现了良好的共存。ISM 频段无须授权频段的成功应用,证明了频谱共享的可能性,也从侧面动摇了传统的频谱分配方法。一些新的共享频谱资源的思想 and 无线技术应运而生。

1999年 Joseph Mitola 提出了认知无线电(Cognitive Radio, CR)^[21,22]的概念,试图用一种智能的无线电平台来提高频谱的利用率。经过十余年的研究和发展,目前学界公认的认知无线电的定义以下有三种。

1. 由 Joseph Mitola 提出^[23]:具有高度智能的无线平台,可以分析用户的状态和需求来为用户提供最符合其需求的资源;感知无线环境的变化来选择最优的服务;并通过“无线电知识描述语言”(Radio Knowledge Representation Language, RKRL)来提供更强的灵活性。

2. 由 FCC 提出^[13]:设备具有和环境进行交互的能力,可以自适应地改变自身的发射机参数和其他设置等而无须改变其硬件的一种新型无线电通信平台。

3. 由 Simon Haykin 提出^[24]:认知无线电是一个对周围环境进行感知的智能系统,其内部的节点和网络可以通过对环境的学习自适应地调整工作方式和状态,避免对其他系统的干扰。

认知无线电系统采用频谱感知、干扰避让、资源分配等技术接入授权频段,并避免引入干扰,从而在特定的频谱范围内实现共存,提高频谱利用率。在认知无线电系统中,为了实现预期的智能自适应功能,必须采用多种新技术和新方法。其中的关键技术主要包括以下两类。

(1) 频谱感知技术

频谱感知技术主要的目的是通过测量周围电磁环境数据,经过相应的算法从这些数据中提取出授权用户在该频段的工作状态,并克服实际环境中存在的多种干扰因素,提高频谱感知结果的可靠性。这一技术在认知无线电中具有极其重要的地位,是认知无线电实现既定目标的依赖和基础。本文中认知无线电关键技术的研究也将集中在这一领域。

(2) 频谱共享和管理技术

基于频谱感知技术提供的结果,对可用的频谱资源进行尽可能合理的管理和高效的利用。频谱共享和管理技术作为一个较为宽泛的定义,其中包含了对于频谱资源的划分和分配、发射功率的分配和调整、干扰抑制等方面。在不同的条件下,考虑到授权用户及其他因素的变化,认知无线电系统的共存及资源分配公平性等,频谱共享技术需要利用最优化、博弈论等数学手段进行研究。

1.2 认知无线电的发展与标准化工作

认知无线电最为重要的特征是对周围环境的自适应,其可以工作在那些未被充分利用的授权频段上而对原先授权用户不产生强烈干扰,这将为无线通信系统的发展提供极大的空间。因此,这一概念的提出,立即引起了各界极大的兴趣,美国联邦通信委员会甚至已于2003年12月将认知无线电技术作为实现频谱协商和共享的候选方案^[25],并说明:“只要具备认知无线电功能,即使是其用途未获许可的无线终端,也能使用需要无线许可的无线频段”。而在这之后,有关认知无线电技术的标准化和相关研究也广泛地开展起来:

- 2004年5月,FCC建议:非授权的无线电设备可在电视广播频段内操作;
- 2004年11月,IEEE正式成立了IEEE 802.22工作组,这是世界范围内第一个基于认知无线电技术的标准化组织;
- 2004年11月,IEEE成立了IEEE 802.16h工作组,其致力于利用认知无线电等技术解决设备的共存问题,从而使IEEE 802.16系列标准可在UHF电视频段进行应用;
- 2005年9月,IEEE 802.22标准工作组完成了对无线地域网的功能需求和信道模型等相关文档;
- 2005年,IEEE成立了IEEE 1900标准组,主要负责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,推进认知无线电的研究工作;
- 2006年,IEEE 802.22标准工作组开始对业内提交的提案进行审议,在

2006年3月,最终形成了合并的提案以作为编写标准的基础;

- 2006年6月8日到10日,首届面向无线网络和通信技术的国际认知无线电技术大会 IEEE CrownCom 在希腊召开;

- 2007年3月22日,IEEE 1900 标准组变更为 IEEE SCC 41,其中包括4个工作组:IEEE 1900.1 工作组,主要负责解释和定义有关下一代无线电系统和频谱管理的术语和概念;IEEE 1900.2 工作组,主要为频带内以及邻带干扰的共存分析提供操作规程建议;IEEE 1900.3 工作组,评估无线电系统的频谱接入行为;IEEE 1900.4 工作组,为动态频谱接入提供实际应用、可靠性验证等;

- 2008年6月,软件无线电论坛第59届大会上,将空白电视频段的使用作为重要的议题进行了探讨。

同时,各国针对认知无线电在军事和民用领域的研究也正积极进行:

- 美国国防高级研究计划局为了有效地利用频谱资源,启动了下一代计划。该计划主要致力于开发允许多用户共享频谱的技术。其中实现灵活的频谱分配是这一计划的主要目标之一。

- 美国加州大学伯克利分校 R. W. Brodwen 教授的研究组开发研制了 CORVLJS 系统,该系统使用虚拟空闲授权频谱来研究认知无线电技术,并依据他们的研究及相关成果,设计并实现了伯克利仿真平台。

- 端到端可重配置项目(End-to-End Reconfigurability, E2R)是欧洲委员会第六框架项目的一个综合性项目。可为多种协议和应用等提供通用的平台和相关条件,以可升级、可重配置的基于认知算法的架构来优化资源利用。

- 我国在2009年以认知无线网络基础理论与关键技术研究为题目进行了973项目立项,主要研究认知无线电依托对频谱条件、网络状况和用户需求的学习,实现资源的高效共享以及充分利用。

- 中国国家973基础研究计划、国家高技术研究发展计划(863计划)和国家自然科学基金于2005年7月开始持续资助或设立课题研究认知无线电技术,对认知无线电物理层和媒质接入控制层的关键技术、协议体系结构、应用场景分析等方面做了具体深入的研究。

虽然认知无线电领域有无数学者在进行各个方面的研究并提出不同的方案,但在基本的目标和概念上形成了一些通行的共识:

利用目标——频谱空洞。

在认知无线电系统中,由于利用的是授权频段,未被利用的频谱可能随时出现或者消失,受到各种原因影响,频谱上的功率也会变化。因此,认知无线电中将频谱资源建模成一个时间、频率和功率三个维度上的变量,称为频谱空洞^[26]。认知