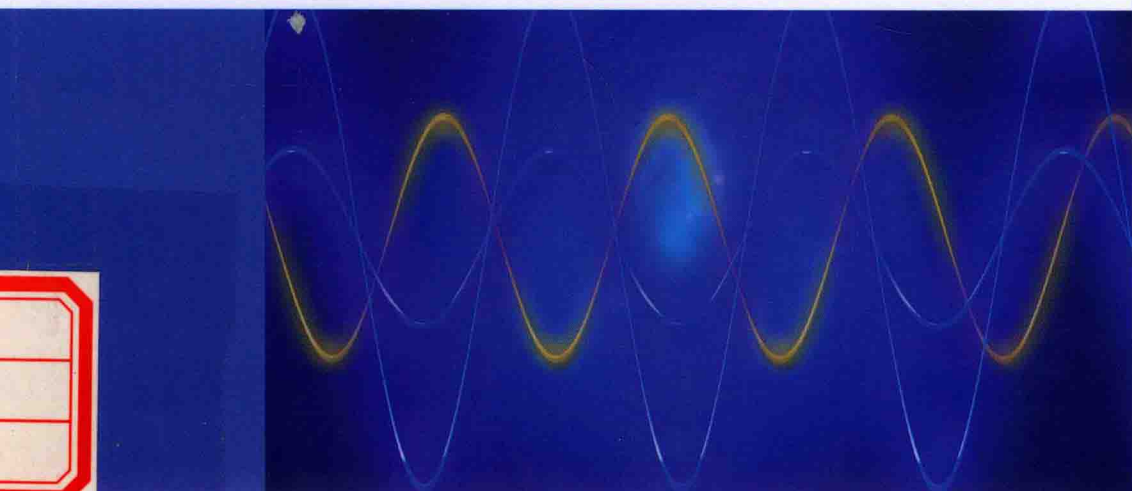


基于overlay频谱共享模式的 认知无线电传输机制与方法

谢 萍 张明川 吴庆涛 著



科学出版社

基于 overlay 频谱共享模式的 认知无线电传输机制与方法

谢 萍 张明川 吴庆涛 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是一部有关认知无线电 overlay 频谱接入技术的专著,本书的中心理念是认知无线电技术与协作技术的有效结合。针对当前移动通信系统中频谱资源短缺和高系统性能需求等问题,重点讨论了基于 overlay 频谱共享模式的认知无线电传送机制与方法。内容主要围绕 overlay 频谱共享模式的几种实现策略而开展,分别研究了点对点通信系统、多跳通信系统、连续型通信系统以及干扰受限系统中的频谱效率和容量。分析了无线资源的优化配置方案对系统频谱效率和容量的影响。此外,本书还涉及了认知无线电协作技术的前沿理论,分析了认知协作技术在各领域中的应用状况。

本书可供通信系统、信号处理、无线网络等方向的专业技术人员以及高等学校教师及研究人员阅读与参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于 overlay 频谱共享模式的认知无线电传输机制与方法 / 谢萍,张明川,吴庆涛著. —北京:科学出版社,2016
ISBN 978-7-03-049128-2

I. ①基… II. ①谢…②张…③吴… III. ①无线电通信-传输-研究
IV. ①TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 143259 号

责任编辑:孙伯元 王 苏 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏志印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 6 月第一次印刷 印张:13 1/2

字数:260 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着智能终端的普及、移动互联网业务的发展以及无线通信业务需求的快速增长,可用频谱资源变得越来越稀缺,频谱资源的短缺成为制约移动通信网发展的一个极其重要的因素。然而,美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)的大量研究表明,一些非授权频段,如工业、科学和医用频段以及适于陆地移动通信的 2GHz 左右的授权频段过于拥挤,而有些授权频段却在大部分时间处于空闲状态。实际上,人们大部分时间所用到的频谱只占有所有可用频谱的 2%~6%。由此可见,频谱并不是真的匮乏,而是没有被合理管理。因此,对不可再生的频谱资源实现再利用的频谱共享技术受到了人们的广泛关注。认知无线电技术就是在上述背景下发展起来的。它是在 1999 年,由 Mitola 首次提出的一种智能的频谱共享技术。认知系统能自动感知所处的频谱环境,通过智能学习来实时调整适应调制、编码、信道协议和带宽等传输参数,以实现时间、频率以及空间上的多维频谱接入,使得频谱利用更加灵活,可显著地提高频谱的利用率,特别是允许未授权用户(也称二级用户或认知用户)使用授权用户(也称主用户)的频谱。它是一项近年来被学术界所研究的热门无线通信技术。

在无线通信网中,协作技术融合了分集和中继两种技术的优势,可对抗无线信道的衰落,提升信道容量和无线链路的传输可靠性,扩大无线传输的覆盖范围,并大幅度地提高无线资源的利用率。基于协作技术的认知无线电频谱共享方案能充分发挥授权用户和认知用户之间或认知用户之间相互协作所带来的空间分集增益效果,并且有效运用中继技术的优势,以此较大地提升授权用户和认知用户的传输质量;同时又能充分利用可用的频谱资源,减少用户间干扰并避免数据碰撞,从而进一步提高频谱利用率。因此,认知协作传输技术的研究具有重要的理论与实践意义。

1. 认知协作传输技术对移动通信网的影响

快速增长的移动互联网业务和海量的移动终端的网络接入,要求移动通信系统具有更高的性能指标。其中,频谱效率是体现移动通信系统容纳用户数量和实现可靠通信性能强度的一项极其重要的指标。经研究表明,认知无线电技术是一项能有效提升频谱效率的技术。认知无线电技术中有三种经典接入模型,即交织(interweave)模型、衬垫(underlay)模型与重叠模型(即 overlay 频谱共享模型)。重叠模型的核心思想是利用认知用户来协助授权用户传输,而认知用户的传输不

受限制,因此它是三者中具有最好系统性能和最高频谱效率的模型。在认知重叠模型系统中,高效可靠的传输技术可以改善二级用户和主用户的系统性能,使系统的频谱共享机会增大,故而可使移动通信系统具有较高的频谱效率和较好的通信性能,进而促进了移动通信网的快速发展和应用。

2. 认知协作传输技术的战略意义

认知无线电技术发展到了 2007 年,哈佛大学的 Tarokh 在分析认知信道容量时首次提出将认知无线电分为三种类型,这三种类型的名称、定义及具体划分界限却没有明确阐述。2009 年,Goldsmith 等从信息论的角度分析了认知无线电,根据认知用户所得到边信息的不同,将认知无线网络模型划分为交织、衬垫及重叠三种模型,并明确定义和详细分析了这三种模型。在本书中,重叠模型也称为补偿式模型。由定义可知,交织模型要求二级用户能较准确地检查出主用户的频谱空洞,所以二级用户必须具有精确快速的频谱检测能力和迅速的频谱切换能力。在实际系统中,主用户频谱资源占用情况是实时变化的,而且现有硬件设备和数据处理方法的局限性,使得一般的移动终端还不具有高精度的检测频谱空洞的能力。衬垫模型需要获得从二级发射端到主用户接收端准确的信号强度。如果该信号强度无法准确得到,二级用户将一直使用最低的发射功率来通信,这样会大大降低频谱的利用率,使得系统性能显著下降,而且在实际非协作系统,该信号强度很难获得。重叠模型的本质是认知用户和授权用户的协作传输,它要求二级用户可以获得主用户的信道信息、码本信息及传输信息,而这些信息对于一般的实际非协作系统是无法完全获得的,故该模型在实际系统中难以实现。因此,在实际系统中不易实现这一问题是当前认知无线电研究的主要突破难点。

3. 认知协作传输技术的行业特征和市场空间

由于传统的通过硬件设备改造升级来完成移动通信新技术改革的方法仍存在很多问题,而随着无线通信新技术和方法的开发,又出现了一些新问题,如通信系统的兼容性差、不同网络间的互联互通互操作程度低、不同网络间以及同一网络不同用户间的资源配置不合理,从而造成了网络资源的浪费等,这在很大程度上制约了移动通信技术的进一步发展。而认知协作传输技术是一种能实现通信新概念和新体制的技术,它能实现较高的频谱效率和数据传输速率,也能适应技术升级和改造后的新通信情况,它的应用市场将获得突破性的进展。因此,认知协作传输技术具有光明的发展前景和广阔的应用市场。

本书基于当前认知 overlay 频谱共享协作传输技术的研究成果,致力于研究较高频谱效率、较高传输速率、较高系统可靠性的传输策略,并在认知 overlay 频谱共享协作传输的理论与方法研究中取得了以下成果。

1) 阶段式协作传输方案

基于阶段式的认知 overlay 协作传输方案的工作原理简单,易于实现,应用灵活,因此是认知 overlay 协作传输方案中应用最为广泛的一种。然而,现有研究很少关注二级系统的有效可靠通信,且多个二级用户竞争时,用户的选择具有不公平性,并且只有保证有两个二级用户以上才能实现二级数据通信。本书针对上述问题,提出了一种基于最佳协作用户选择的两阶段式传输策略,其中选择二级用户参与协作传输可提升主用户的系统性能,增大了两者频谱共享的机会,以此来提升点对点移动通信系统的频谱效率和性能。

2) 面向多跳系统的传输方案

主用户系统为多跳传输系统时,二级用户根据前一跳上主用户的通信来获取当前跳上协助传输所需信息,从而赢得频谱接入的机会,这是一种典型的认知 overlay 频谱共享系统。目前,关于该系统的研究中极少考虑二级用户间的协作,且其中所采用的叠加编码和正交复用技术限制了主用户和二级用户系统性能的提升。为此,本书提出了一种基于多个二级用户并行通信的多跳传输策略,其中设计的机会路由由中继选择方案和并行通信用户选取的搜索算法能较大提升二级用户的性能,同时使主用户性能有一定的提升,故而提高了远距离移动通信网的频谱效率和性能。

3) 基于 TPSR 机制的传输方案

基于 TPSR(two path successive relaying)机制的认知 overlay 频谱共享传输方案允许主用户连续传输,而不需要改变传统的主用户传输方式,以此提升了主用户和二级用户间的协作机会。由于 TPSR 传输机制必定会导致系统中用户间的干扰,将其引入常用的认知 overlay 频谱共享系统中,认知系统所采用的叠加编码技术会加深 TPSR 传输实现过程中的用户间干扰。为了降低这种用户间干扰,本书提出了一种基于译码转发和 TPSR 机制的多用户选择传输策略。其中采用的非叠加编码方案能简化系统设计,而 TPSR 传输机制能在主用户的连续通信基础上,使通信系统具有良好的主用户系统性能,从而更有利于提升传统移动通信系统的频谱效率和性能。

4) 面向 ARQ 系统的传输方案

基于 ARQ(automatic repeat request)机制的认知 overlay 频谱共享中,当主用户数据通常要经历重传才能被成功传输时,二级用户可通过接收前一次传输的主用户数据来获取重传时隙协助传输所需的信息,这是一种具体而实际的认知 overlay 频谱共享系统。在强干扰场景下,现有的基于 ARQ 机制的认知 overlay 频谱共享系统性能受到了极大的限制。为突破此限制,本书提出了一种基于协作干扰管理与频谱接入之间切换的频谱共享策略,其中设计的主用户和二级用户间协作干扰管理传输方案,使具有强干扰环境的移动通信网的频谱效率和性能有所提升。

5) 认知协作无线电系统的资源配置

系统的资源优化配置是提高系统性能的一种有效手段。认知无线电协作系统中的资源配置主要包括频谱资源配置和用户功率配置。本书以资源配置为出发点,探讨了认知无线电协作系统中资源分配的基本元素、资源分配目标函数的设计以及资源分配问题的求解方法。为读者提供了一套用于把握认知无线电协作系统资源配置方案的整体思路。

6) 认知协作技术的应用

多种异构网络并存已经成为当前信息网络的重要特征,异构网络下的认知无线电技术又表现出新的特征和技术需求。为此,本书介绍了认知异构网络的体系架构,并说明了认知异构网络各部分的组成及其功能,并对其中的关键技术进行了一定的研究。未来无线通信网络、无线传感器网络以及物联网是信息产业发展的重要支柱,而认知协作技术既能提升频谱效率又能提高系统性能,因此本书总结综述了认知协作技术在未来无线通信网络、无线传感器网络以及物联网中的应用,向读者展示了认知协作技术对信息行业发展的重大意义。

本书得到国家自然科学基金(U1404611)、河南省高校科技创新团队与人才(14IRTSTHN021,16HASTIT035)以及河南省科技创新杰出人才(164200510007)等项目资助,由河南科技大学的谢萍副教授、张明川副教授及吴庆涛教授共同撰写完成。其中,谢萍副教授完成了 14.5 万字,张明川副教授完成了 10 万字、吴庆涛教授完成了 1.5 万字。在本书的撰写过程中得到了河南科技大学的普杰信教授、郑瑞娟副教授、朱军龙博士等的支持与帮助,在此一并表示感谢。

由于基于 overlay 频谱共享模式的认知无线电传输机制的研究仍处在不断深入发展之中,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。

作 者

2015 年 12 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 认知无线电技术简介	2
1.2.1 认知无线电系统工作流程中的关键技术	2
1.2.2 认知无线电中三种频谱共享模型	5
1.3 认知无线网络中的协作技术	11
1.3.1 协作中继传输	11
1.3.2 协作感知技术	12
1.3.3 协作频谱共享技术	14
1.4 本章小结	16
参考文献	17
第 2 章 基于 overlay 频谱共享模式的认知无线电系统	23
2.1 引言	23
2.2 阶段式传输中的认知 overlay 频谱共享模式	23
2.2.1 系统模型及工作原理	24
2.2.2 主用户系统实现速率	25
2.2.3 二级用户系统实现速率	26
2.3 多跳传输系统中的认知 overlay 频谱共享模式	27
2.4 TPSR 传输中的认知 overlay 频谱共享模式	28
2.5 ARQ 系统中的认知 overlay 频谱共享模式	30
2.6 研究意义与现状	32
2.6.1 研究的意义	32
2.6.2 研究的现状及挑战	33
2.7 本章小结	36
参考文献	36
第 3 章 实现认知 overlay 频谱共享系统的协作与接入技术	40
3.1 引言	40

3.2	实现认知 overlay 频谱共享的典型协作方式	41
3.2.1	协作中继传输	41
3.2.2	协作干扰管理	42
3.2.3	协作能耗控制	43
3.3	频谱接入技术	44
3.3.1	频谱接入控制	44
3.3.2	动态频谱接入类型	45
3.4	协作频谱租赁	47
3.4.1	协作频谱租赁研究现状	48
3.4.2	协作频谱租赁系统工作原理	50
3.5	本章小结	53
	参考文献	53
第 4 章	基于阶段式的认知 overlay 频谱共享模式传输策略	56
4.1	引言	56
4.2	基于传统阶段式的认知 overlay 频谱共享模式策略	56
4.2.1	传统的两阶段式传输策略	57
4.2.2	三阶段式传输策略	59
4.3	基于最佳协作用户选择的阶段式认知 overlay 频谱共享模式策略	60
4.3.1	系统模型和设计原理	61
4.3.2	最佳协作用户的选取准则	63
4.3.3	理论性能分析	64
4.3.4	仿真验证	66
4.4	本章小结	69
	参考文献	70
第 5 章	面向多跳传输的认知 overlay 频谱共享模型传输策略	72
5.1	引言	72
5.2	传统协作机会路由的认知多跳传输策略	73
5.2.1	系统模型和工作原理	73
5.2.2	通信模式和机会路由方案	74
5.2.3	传统策略的性能分析	76
5.3	基于多个二级用户并行通信的认知多跳传输策略	78
5.3.1	系统模型和设计原理	78
5.3.2	路由选择方案	80

5.3.3 实现并行通信的二级用户的选取法则	81
5.3.4 理论性能分析	83
5.3.5 仿真验证	84
5.4 本章小结	87
参考文献	88
第 6 章 基于 TPSR 机制的认知 overlay 频谱共享模式传输策略	90
6.1 引言	90
6.2 传统的基于 TPSR 机制的传输策略	92
6.2.1 主要工作原理	92
6.2.2 TPSR 机制的实现条件	95
6.2.3 主用户系统性能	97
6.2.4 二级系统性能	99
6.2.5 系统参数优化设计	100
6.2.6 性能仿真对比	102
6.3 基于 TPSR 机制和多用户选择的认知 overlay 频谱共享模式传输策略	104
6.3.1 系统模型和设计原理	105
6.3.2 二级发射节点的选取准则	107
6.3.3 理论性能分析	109
6.3.4 仿真验证	114
6.4 本章小结	117
参考文献	118
第 7 章 面向 ARQ 系统的认知 overlay 频谱共享模型传输策略	120
7.1 引言	120
7.2 传统面向 ARQ 系统的认知 overlay 频谱共享模型传输策略	121
7.2.1 系统模型和基本原理	121
7.2.2 系统性能分析	125
7.3 面向 ARQ 系统的认知 overlay 频谱共享模式干扰管理传输策略	127
7.3.1 系统模型和设计思路	128
7.3.2 传输原理	129
7.3.3 理论性能分析	133
7.3.4 仿真验证	137

7.4 本章小结	141
参考文献	142
第8章 认知频谱共享系统资源配置	144
8.1 引言	144
8.1.1 无线网络资源分配	144
8.1.2 无线网络跨层设计	145
8.2 认知协作无线网络资源分配	146
8.2.1 资源分配的基本单元	146
8.2.2 研究现状的分析	147
8.3 认知协作无线网络目标	149
8.3.1 最大化目标	151
8.3.2 最小化目标	151
8.3.3 公平性目标	152
8.3.4 性能分析目标	152
8.4 资源分配问题类型与求解方法	152
8.4.1 资源分配问题类型	152
8.4.2 资源分配问题的求解方法	153
8.5 本章小结	153
参考文献	154
第9章 异构融合网络中的认知 overlay 频谱共享传输技术	159
9.1 引言	159
9.1.1 异构网络融合的发展	159
9.1.2 无线异构网络融合的方案	160
9.1.3 异构网络融合的主要特征	162
9.2 认知异构网络架构与系统模型	163
9.2.1 认知无线异构网络的主要特征	163
9.2.2 认知异构无线网络架构	164
9.2.3 智能网络节点的组成及功能	166
9.3 认知异构网络的关键技术	168
9.3.1 自适应协同调度机制	168
9.3.2 分布式跨层设计方案	170
9.3.3 无缝切换技术	171
9.4 认知无线异构网络中的资源管理	172

9.4.1 无线异构网络资源分配	172
9.4.2 认知异构网络资源分配场景及模型	173
9.4.3 认知异构网络资源分配方案的实现	176
9.5 本章小结	177
参考文献	177
第 10 章 认知协作传输技术的发展	180
10.1 引言	180
10.2 未来移动网络的发展	181
10.2.1 未来移动通信网络中的认知协作思想	182
10.2.2 认知协作与未来移动通信网络中关键技术的融合	184
10.2.3 认知协作网络对移动通信研发的推进	185
10.3 无线传感网络中的发展	186
10.3.1 认知无线传感器网络定义及研究现状	187
10.3.2 认知无线传感网络节点	188
10.3.3 认知无线传感网络的频谱管理架构	188
10.4 物联网中的发展	191
10.4.1 物联网的体系架构	191
10.4.2 物联网中认知无线电技术	192
10.5 本章小结	193
参考文献	193
附录 缩略语对照表	196
后记	199

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

随着通信技术的飞速发展和无线通信需求的快速增长,海量的通信设备通过无线局域网(wireless local area network, WLAN)、无线个域网(wireless personal area network, WPAN)等技术接入互联网和电信网^[1]。这导致了无线通信技术面临两方面的挑战:一方面,有限的无线通信频谱资源无法满足各种无线网络及其内部不断增长的业务需求;另一方面,无线信道环境的不确定性和时变性导致通信不可靠和网络不连通。

目前,无线频谱资源的管理方式是静态的,一般是由相关政府机构对无线频谱资源进行统一规划和管理,其中大部分的频谱资源已经授权分配给某些通信业务专用,即使这些频谱资源不被相应的业务占用,它也不能被其他业务所使用。而较少的频谱资源被划为未授权频段,能用于公共通信和新兴业务接入需求。因此,实际通信环境中频谱资源使用情况在时间和空间上存在着巨大的差异。往往当网络中成批的新用户接入和新业务出现时,未授权频段被频繁使用而变得过于拥挤,而某些授权频段只用于特殊通信而很少被使用甚至经常被闲置。例如,美国联邦通信委员会的调查报告表明^[2],在纽约,30MHz~3GHz 频段的实际利用率仅为 13.1%;加利福尼亚大学伯克利分校的频谱测量结果表明^[3],在伯克利市中心,3~5GHz 的频谱利用率不超过 0.5%;新加坡的频谱利用率也只有 5%左右^[4];此外,在我国,授权频段的利用率一般都在 30%以下^[5]。由此可见,导致现有无线频谱资源紧张的原因并不是频谱真正缺乏,而是频谱利用率较低。

为了能有效利用频谱资源,近年来,频谱共享技术^[6]受到广泛的关注和研究,其主要思想为:在不影响授权用户通信需求的条件下,允许非授权用户使用授权用户的频谱资源。频谱共享技术在实际中是可行的,它既能保证授权用户的通信质量又提高了频谱利用率。基于上述思想,1999 年,Mitola 提出了一种智能的频谱共享技术,即认知无线电技术^[7],该技术在随后的十几年里得到了学术界和工业界的广泛研究。

1.2 认知无线电技术简介

认知无线电(cognitive radio,CR)技术是一种能够对不可再生的频谱资源实现再利用的频谱共享技术,是近年来受到人们广泛关注的无线通信技术。图 1-1 概述了认知无线电技术的发展过程,认知无线电技术是在软件无线电技术^[8]的基础上逐渐发展起来的。Mitola 在 1999 年首次提出了认知无线电的概念^[7],而在文献[9]中, Haykin 阐述了认知无线电的基本概念、体系结构以及一些尚待解决的关键问题,其中定义了认知系统能自动感知所处的频谱环境,通过智能学习来实时地自适应调整调制、编码、信道协议和带宽等传输参数,以实现时间、频率及空间上的多维频谱接入,使得频谱利用更加灵活,因此它被认为是解决频谱资源紧缺、提高频谱利用率的有效途径,特别是可让未授权用户(也称为二级用户或认知用户)使用授权用户(也称为主用户)的频谱,因此认知无线电成为近年来无线通信领域研究的热点。

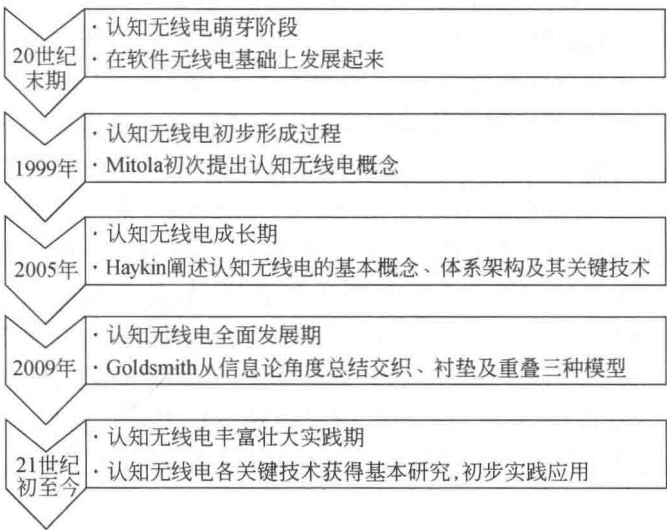


图 1-1 认知无线电技术的发展过程

1.2.1 认知无线电系统工作流程中的关键技术

文献[9]中总结了认知无线电物理层和 MAC(media access control)层的特性以及工作模式,其中介绍的认知无线电系统工作流程如下:通过监听系统预设的反馈信道,二级接收端可检测到信道的相关信息[如频谱空洞(spectrum hole)^[10]、通信统计量、信道容量等],并将这些信息传送给二级发射端。发射端再根据接收到

的信息选择合适的传输频段,设置相应的发射功率等参数。图 1-2 说明了认知无线电系统中的认知循环过程,该过程主要包括三个模块,即频谱环境分析(radio-scene analysis)、信道环境识别及预测(channel-state estimation)和功率控制与动态频谱管理(transmit-power and spectrum management),其中前两个模块是认知无线电工作的前提,第三个模块是实现频谱共享的关键。根据认知无线电系统的工作流程可归纳出四个基本步骤:频谱感知、频谱分析、频谱接入和频谱移动,其中前两个步骤属于频谱环境分析和信道环境识别及预测两模块,后两个步骤属于功率控制与动态频谱管理模块。按照通信网络分层归属,频谱感知是物理层所需处理的问题,频谱分析、频谱接入以及频谱移动技术都跟上层相关,需要实现跨层联合处理,如融合分析感知信息和机会式动态频谱接入将在 MAC 层实现,又在路由层选择合适的频段作为信道以实现跨层路由等。下面将分别介绍这四个步骤并分析各步骤中所需解决的技术问题。

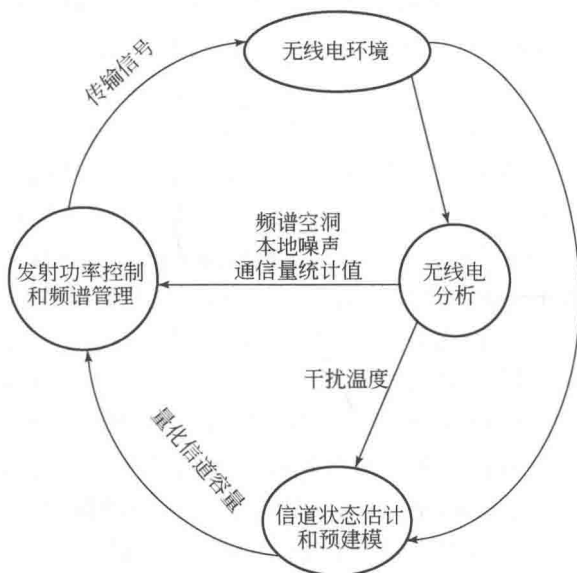


图 1-2 认知无线电的关键功能

频谱感知:在认知无线电系统中,虽然有些主用户为满足通信需求,可能主动将自己所拥有的频谱资源告知二级用户,但一般来说,二级用户想要共享主用户的频谱资源,就必须自主感知周围环境中主用户的频谱状况,即二级用户独立、可靠地通过频谱感知对目标频段进行检测,确定被感知频段的状态以及主用户的活动情况。根据信号检测和分析的方法,文献[11]介绍了一些单点频谱感知方法,其中主要介绍了能量检测(energy detection)、匹配滤波器检测(matched filter detection)和特征值检测(feature detection)等方法,而文献[12]所提出的基于压缩感知

的信号检测方法也受到人们的广泛关注。根据系统中用于检测信号设备的等级,频谱感知可以分为集中式和分布式两种。集中式频谱感知是指在二级系统中设置一个具有强大功能的中央控制器,由中央控制器来完成系统感知任务,然后将结果告知各个通信用户,那么各通信用户可以是复杂度较低的设备,但要求中央控制器具有很优越的地理位置以便快速、精确感知周围的频谱环境。分布式感知是指各二级用户先独立完成感知任务,再根据各二级用户间的联系实现频谱感知结果共享。分布式感知可分为两大类,即非协作感知(non-cooperative sensing)和协作感知(cooperative sensing)^[13~15],其中协作感知可以提高信号检测的精确度和可靠度,但用户间的协作会导致信令交互开销的需求和信息处理的时延。

频谱感知技术是认知无线电系统中不可或缺的关键技术。目前,人们已对该技术中的关键问题进行了广泛的研究:文献[16]研究了如何感知主用户接收机的存在;文献[17]研究了通信系统将如何抉择主动感知和被动感知;文献[18]研究了协作感知中的信令开销和检测准确度之间的折中问题;文献[19]研究了感知能力限制下的多信道感知问题;文献[20]研究了非对称感知能力场景下的感知优化问题。

频谱分析:在认知无线电系统中,由于主用户的频谱资源利用状况在时间-空间-频率领域中呈三维变化趋势,因此合理分析和归纳出有用的频段是频谱分析的主要目标。通过对系统频谱特性^[21]的分析,二级用户将获得最适合二级用户数据传输的通信频段和一些相关的传输参数。频谱分析的主要过程如下:首先,认知无线电系统要学习和分析频谱感知的结果,通过对无线信道状态的观测建立好二级用户周围环境的知识库,即为频谱学习阶段,该阶段的主要实现方案有机器学习(machine learning)算法^[22]、遗传学算法(genetic algorithm)^[23]、模糊逻辑控制(fuzzy control)技术^[24]等;其次,根据频谱学习时所建立的知识库,二级用户通过频谱分析来获取干扰估计信息、频谱空洞的有效期限以及二级用户和主用户发生通信冲突的概率信息等,同时分析信噪比、频谱空洞的平均持续时间以及相关性等信息来量化频谱质量,从而确定二级用户是否能进行频谱接入;最后,根据主用户系统的约束条件和二级用户系统的优化目标,确定好频谱接入的参数。其中第二阶段是频谱分析中的关键。

在频谱分析技术中,如何根据频谱感知的结果预测主用户接收端的干扰限制,如何根据已有的频谱特性知识库来预测将来的频谱动态特性^[25]等是研究的重点。

频谱接入:在认知无线电系统中,可根据频谱分析出的频谱空洞平均持续时间、所感知的频段上的信道质量、二级用户接入该频段的效用等参数来确定频谱接入的决策模型。由于二级用户的频谱感知可能会出现错误,根据感知结果决定是否接入目标频段,确定接入后使用合适的发射功率和调制编码方式以及多个二级用户之间如何实现机会式频谱共享。针对上述问题,一般来说,当漏检概率较大

时,二级用户需要采用保守的接入策略;当虚警概率较大时,二级用户应采用激进的接入策略。总之,二级用户的频谱接入策略应该在错过传输和避免给主用户造成冲突之间进行权衡,因而需要进行频谱感知和频谱接入的联合优化。另外,二级频谱接入持续时间也是一个重要的参数,因为接入时间太长,二级传输会给后续的主用户数据传输造成冲突,而接入时间太短时又浪费了频谱资源。二级用户的频谱接入主要通过认知无线网络中的 MAC 协议(media access control protocol)来实现,而避免二级用户之间以及二级用户和主用户之间的通信冲突是设计 MAC 协议的主要目标。

在频谱接入技术中,MAC 层接入协议的设计是研究的关键。文献[26]设计了一种实现填充式频谱接入的 OSA-MAC 协议;文献[27]设计了一种基于跨层优化的机会式多信道接入 MAC 协议;假设所有信道具有显示信道容量的能力,文献[28]研究了 5 种基于公平性和通信成本的频谱接入选择策略;文献[29]研究了基于硬件条件约束的 HC-MAC 协议;文献[30]设计了基于部分可观察马尔可夫决策过程的分布式认知 MAC 协议。根据现有对频谱接入技术的研究,需要分析的问题为:如何根据感知结果判定单个二级用户是即时单信道接入还是在获得系统统计信息后再单信道接入,以及接入后所采用的调制编码方法、发射功率和接入持续时间。在多用户多信道的频谱接入技术中,同样要考虑这些问题。另外,为了避免冲突、减少干扰还需要设计高效的 MAC 协议。

频谱移动:频谱移动是随着认知无线电技术发展而产生的一个概念,即当检测到目标频段即将被主用户使用,或者主用户的业务需求有所变化后,二级用户就不能再使用该目标频段进行通信,因此需要转换到其他可用频段上继续通信,这一过程称为频谱切换^[31,32]。主用户拥有授权频谱,二级用户能使用主用户暂时不用的授权频谱,而当主用户继续使用授权频谱时,二级用户想继续使用该授权频谱,则必须降低发射功率来避免对主用户造成有害干扰,或者终止对此授权频谱的使用而切换到其他合适的授权频谱。当二级用户确定了切换后所使用的频谱,需要设置与新频段相匹配的二级用户不同协议层的参数,这样才能确保新频段上二级用户传输的继续,且其传输速率和质量不被切换所影响。文献[33]提出一种基于链路信噪比的机会式跳频 MORA 协议,并且定义了一种衡量频谱切换代价的标准;文献[34]研究了根据特定频段上频谱切换的次数来选择频段的协议。在频谱切换过程中,如何寻找最优的切换频段以实现平滑切换是研究的关键。频谱切换中所产生的时延,频谱切换后的新频段是否被其他二级用户使用,另外,二级发射还必须通知二级接收进行传输同步,这些都是该过程所要研究的问题。

1.2.2 认知无线电中三种频谱共享模型

1.1.1 小节以认知无线电系统工作流程为主线来阐述该领域中的关键技术,