
Cognitive Radio
Technology and Application

认知无线电 技术与应用

党建武 李翠然 谢健骊 编著
Dang Jianwu Li Cuiran Xie Jianli

清华大学出版社



Cognitive Radio
Technology and Application

认知无线电 技术与应用

党建武 李翠然 谢健骊 编著
Dang Jianwu Li Cuiran Xie Jianli

清华大学出版社
北京

伴随着无线通信的快速发展,频谱资源日益紧缺。认知无线电(cognitive radio,CR)作为有望解决无线频谱资源紧缺难题的技术,目前已成为业界极为关注和研究的热点。

国外的一些大学和研究机构针对认知无线电体系结构、理论模型和实现平台进行了研究,主要提出了基于 OFDM 的动态频谱接入频谱池(spectrum pooling)系统、基于认知无线电使用非授权频谱的(a cognitive radio approach for usage of virtual unlicensed spectrum,CORVUS)体系结构、基于 OFDM 的认知无线平台(OFDM-based cognitive radio network,OCRA)系统、泛在移动网络动态智能频谱管理(dynamic intelligent management of spectrum for ubiquitous mobile-access network,DIMSUNet)网络结构、基于遗传算法的生物启发认知模型(Bio-CR)、干扰温度多址(interference temperature multiple access,ITMA)动态频谱分配方式等。

在国内,近几年来认知无线电的研究受到了国家的重视和支持。2005 年,国家 863 计划设立了“认知无线电关键技术”研究课题。随后,2006 年和 2007 年国家自然科学基金先后资助了多个 CR 相关研究课题,并在 2008 年加大支持力度,将其作为信息科学部调控重点项目资助,重点解决频谱认知、动态频谱管理和抗干扰方面的技术难题。2008 年,国家 973 计划针对异构网络融合问题,设立了“认知无线网络基础理论与关键技术研究”项目,旨在关注认知无线网络体系结构与协议研究、无线网络认知基础理论与方法研究、智能动态网络资源管理模型与控制机制研究、基于认知的无线网络传输机制研究、端到端重构机理研究等。

因此,作者对本书的选题,就是基于认知无线电技术方兴未艾的研究热潮,同时针对认知无线电技术涉及的技术领域广泛、国内已有书籍各有侧重的局面,根据学术界最新的研究观点和成果,完成了本书的编著。

作者期望通过本书的出版,可以为国内广大科研、教学工作者提供一本认知无线电技术领域的具有不同视野的技术参考书籍,同时本书也可以作为国内无线通信专业研究生和高年级本科生的教学、参考用书。

全书共分 6 章。第 1 章概述了认知无线电技术的产生背景、概念以及认知无线电的能力。第 2 章讲述认知无线电的频谱感知技术。频谱感知是构建认知无线电系统的前提,它包括感知算法和感知机制两方面的内容。本章对常用的频谱感知算法原理、特点及其适用范围进行了分析,此外对频谱感知机制的相关问题进行了讨论。第 3 章论述频谱管理和频谱移动性管理,主要介绍了影响频谱空穴质量的参数及信道估计技术、各种频谱决策规则和决策方式以及频谱切换技术。第 4 章讲述频谱共享技术,首先介绍了频谱共享的实现过程、频谱共享的技术分类;接下来,详细阐述了几种基本频谱共享模型及功率控制技术。第 5 章介绍了路由协议及传输层协议的设计、跨层设计和网络安全技

前言

术,分析了在认知无线网络中的相关技术问题,并对可能的解决方案进行了讨论。第6章介绍认知无线电技术的典型应用实例,包括无线区域网(WRAN)、下一代网络(XG)、超宽带认知无线网络(CUWB)、正交频分复用网络、认知 Mesh 网、认知 Ad hoc 应急通信网络等。

在本书的编写过程中,作者尽力遵照以下原则。

(1) 注重体系,内容安排力争做到主线分明。首先是介绍认知无线电思想的起源,分别对 Mitola 观点、FCC 观点和 Simon Haykin 观点进行了介绍和比较;其次是介绍认知无线电关键技术,由此引出认知无线网络的概念,并对认知无线网络的构成和关键技术进行论述;在此基础上,就应用方面,不仅介绍了 IEEE 802.22 WRAN、XG 网络、超宽带认知无线网络、正交频分多址认知无线网络等几种谈论较多的认知无线网络,还对认知 Ad hoc 应急通信网络、认知 Mesh 网络的应用进行了探讨。

(2) 突出重点。在编写过程中,尽量避免内容的堆砌,而是着重于关键技术的论述。如在认知无线电技术部分,重点对频谱感知、频谱管理、频谱共享等关键技术进行论述。针对频谱感知技术,从频谱感知算法和感知机制两个方面进行阐述,重点阐述了多种盲感知算法。针对频谱共享技术,从频谱共享模型及频谱共享中的功率控制技术两个方面展开论述,重点阐述了基于经济学理论模型和生物激励模型的频谱共享技术,并比较分析了不同的功率控制技术及相应的实现算法。

(3) 面向前沿。认知无线电领域的研究日新月异、涉及面广,因此本书在编写过程中力争做到面向前沿。例如,在“频谱感知策略”一章中,引入了盲感知和频谱感知机制研究这些新的理念和研究内容;在“频谱共享技术”一章中,对多种模型下的频谱共享机制进行了论述,包括博弈论模型、经济学拍卖理论模型、生物激励模型、图着色理论模型、神经网络模型等。同时还对新近开始研究的频谱共享中的功率控制进行了论述。在内容求新的基础上,本书在每章最后,对各种技术所面临的技术难点进行了归纳总结,以引导读者进一步学习和研究。

编写分工为:第1章和第4章部分章节由党建武编写,第2章和第4章部分章节由李翠然编写,第3章、第5章、第6章由谢健骊编写。李翠然校阅了全书初稿,党建武对全书进行了统稿和审定。在编写本书过程中,赵佳颖、王开强做了大量的工作,在此表示诚挚的感谢。

本书的编写得到国家自然科学基金项目(60962004)的支持。

限于编者水平,书中错误和不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2011年9月

第 1 章 概述	1
1.1 无线频谱管理现状	2
1.2 认知无线电的概念和能力	2
1.2.1 认知无线电概念	4
1.2.2 认知无线电的能力	6
1.3 认知无线网络关键技术	7
1.4 认知无线电研究现状	10
1.5 认知无线网络的应用	12
本章小结	14
参考文献	15
第 2 章 频谱感知策略	17
2.1 概述	18
2.2 单点感知	19
2.2.1 基于发射机的频谱感知	19
2.2.2 基于接收机的频谱感知	24
2.2.3 多维频谱感知	27
2.2.4 宽带感知	29
2.3 协同感知	30
2.3.1 分布式合作感知	31
2.3.2 协作分集式合作感知	34
2.4 盲感知	35
2.4.1 基于高阶统计分析的盲感知	35
2.4.2 基于过采样信号的盲感知	43
2.4.3 基于模式选择的盲感知	57
2.5 频谱感知策略的性能比较	61
2.6 频谱感知机制的研究	61
2.6.1 感知模式的选取	62
2.6.2 感知周期优化	63
2.6.3 感知时长计算与优化	64

目录

2.6.4 感知信道策略	66
2.7 频谱感知面临的技术难点	68
本章小结	68
参考文献	69
第3章 频谱管理和频谱移动性管理	71
3.1 概述	75
3.2 频谱分析	75
3.2.1 参数描述	75
3.2.2 信道估计	79
3.2.3 信道预测模型	82
3.3 频谱决策	83
3.3.1 频谱决策规则	84
3.3.2 频谱决策方式	89
3.4 频谱移动性管理	91
3.5 频谱管理和频谱移动性管理面临的技术难点	99
本章小结	100
参考文献	101
第4章 频谱共享技术	105
4.1 概述	106
4.1.1 频谱共享步骤	106
4.1.2 频谱共享分类	107
4.2 频谱共享的基本模型	109
4.2.1 博弈论模型的频谱共享	110
4.2.2 经济学理论模型的频谱共享	121
4.2.3 生物激励模型的频谱共享	131
4.2.4 其他模型的频谱共享	133
4.3 频谱共享中的功率控制	143
4.3.1 基于博弈论的功率控制	144
4.3.2 基于注水算法的功率控制	148
4.4 频谱共享面临的技术难点	155

本章小结	157
参考文献	157
第 5 章 认知无线网络的其他技术问题	163
5.1 认知无线电与认知无线网络	164
5.2 路由协议	164
5.2.1 概述	165
5.2.2 路由协议分析	166
5.3 传输层协议	171
5.3.1 传统无线网络传输层协议面临的问题	171
5.3.2 认知无线网络的传输层协议设计	173
5.4 跨层设计	174
5.4.1 跨层设计概述	175
5.4.2 认知无线网络的跨层设计及优化	176
5.4.3 面临的挑战	180
5.5 网络安全	181
5.5.1 传统无线网络的安全威胁	181
5.5.2 认知无线网络面临的安全威胁及解决方案	183
本章小结	190
参考文献	190
第 6 章 认知无线网络的应用实例	191
6.1 IEEE 802.22 WRAN	195
6.1.1 空中接口	195
6.1.2 系统共存	203
6.2 XG 网络	204
6.2.1 XG 网络架构	204
6.2.2 XG 系统设计	207
6.3 超宽带认知无线网络	209
6.3.1 UWB 和 CR 技术的结合	210
6.3.2 CUWB 脉冲信号波形的设计	211
6.4 正交频分复用认知无线网络	216

目录

6.4.1 OFDM 认知无线网络	216
6.4.2 OFDM 认知无线网络关键技术	218
6.5 认知无线网络的应用	220
6.5.1 认知 Ad hoc 应急通信网络	220
6.5.2 认知 Mesh 网络	222
本章小结	224
参考文献	224

第1章

概述

未来移动通信的一个重要发展趋势就是宽带多媒体通信,限制它的主要原因就是频谱资源的紧张以及频谱分配方式缺乏灵活性,远远不能满足人们的需要。认知无线电通过对授权频谱进行“二次利用”的方式,为缓解频谱资源缺乏与日益增长的无线接入需求之间的矛盾提供了一个可行的思路。认知无线电(cognitive radio, CR)这种新的无线通信技术已成为无线通信领域的研究热点。

认知无线电技术的发展依赖于电信频谱管理政策、技术、认知业务和网络运营等诸多方面的支持。本章主要介绍认知无线电(CR)的产生、概念和认知无线电的能力,认知无线电关键技术,认知无线电的研究现状以及认知无线电网络的典型应用。

1.1 无线频谱管理现状

无线通信是通过电磁波来携带并传输信息的。国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)定义了 300GHz 以下的频谱为无线电波频谱。目前的频谱分配政策为固定频谱分配,即无线频谱资源的规划和使用是由国际频谱监管机构和各国的无线电法规制定部门统一制定的,收发机对它的使用需要得到政府的许可。固定频谱分配将射频(radio frequency, RF)频谱分为两种类型:授权频段和非授权频段。大部分的频谱资源被用来作为授权频段,如电视广播频段。授权频段接入许可证由国家监管机构颁发。牌照包括频段、地址位置和允许的工作参量(如带宽和带外发射等级)。虽然许可证有限定期,但可以更新,以避免受其他通信业务的干扰。非授权频段的频谱资源要少得多,无线局域网(wireless local area network, WLAN)、无线个域网(wireless personal area network, WPAN)和无线城域网(wireless metropolitan area network, WMAN)等无线网络大多使用非授权的频段工作。非授权频段也叫免授权频段,规定了相应的频段和传输特性(非常低的发射功率等级),但没有提供干扰的监管保护。

由于通信行业的迅速发展,频谱资源贫乏的问题日益严重。研究者在通过采用更为先进的无线电通信理论和技术,例如多天线收发技术、传输链路自适应技术等努力提高频谱的利用率的过程中,发现全球使用的授权频段,尤其是在频率需求非常紧张的数百兆赫到 3 吉赫频段的频谱利用率却非常低。而另一方面,相对较少的非授权频谱资源上承载的业务量却很大。图 1.1 描述了 0~6GHz 范围内信号的功率谱密度,显示出各个频段的占用情况。美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)的研究表明^[1],已分配的频谱利用率为 15%~85%。可以看出,目前的固定频谱分配方法是造成频率利用率低下的主要原因。在这种分配方式下,即使主用户在某一时间、地点没有使用其授权频段,其他非授权用户也不能使用该频段,从而导致了频谱资源在时间上和空间上的浪费。有限的可利用频谱和低的频谱资源利用率决定了需要一种全新的、优化使用频谱的无线通信模式^[2]。

1.2 认知无线电的概念和能力

考虑到频谱的使用是动态变化的,随着频段、时间和空间的不同而不同^[3],因此,研究者一致认为动态频谱接入(dynamic spectrum access, DSA)是解决目前频谱低效利用的有效技术。人们开始考虑允许没有许可的用户在对主用户不产生任何干扰的情况下来使用已分配的授权频段,认知无线电的概念应运而生。

认知无线电的基本出发点就是为了提高频谱利用率,具有认知功能的无线通信设备

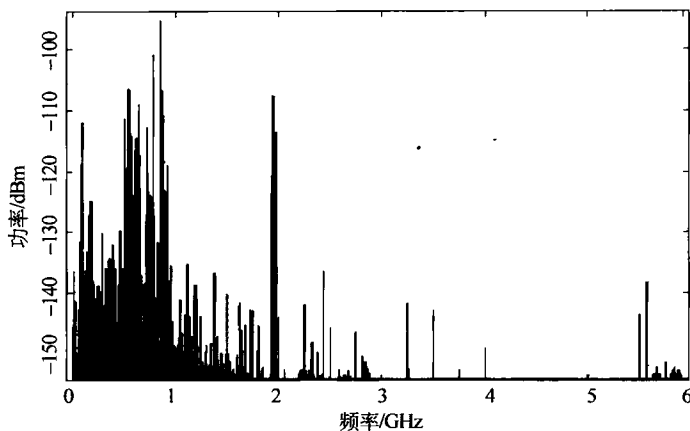


图 1.1 0~6GHz 频段的功率谱密度分布图

可以按照某种“伺机方式”(opportunistic way)工作在已授权的频段内。当然,这一定要建立在已授权频段未使用或只有很少的通信业务在活动的情况下。这种在空域、时域和频域中出现的可以被利用的频谱被称为“频谱空穴”(spectrum holes)或白空(white space)^[4],如图 1.2 所示。

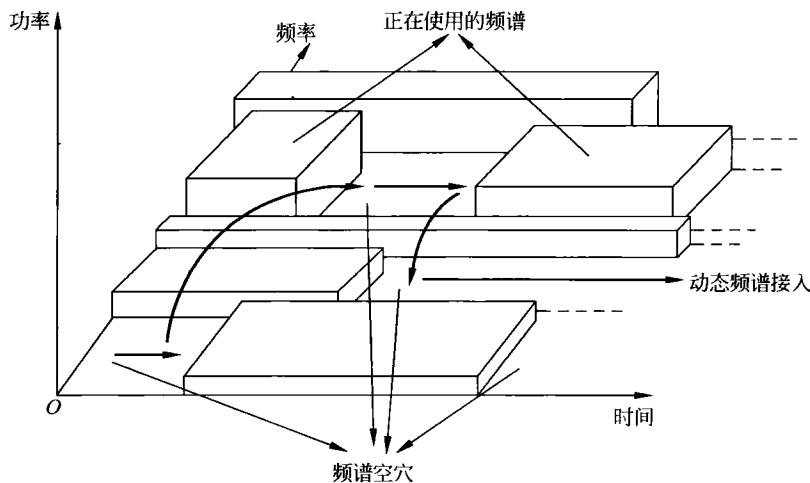


图 1.2 频谱空穴的示意

当然,如果这一频段随后被授权用户(也称主用户,primary user,PU)使用了,那么非授权用户(也称认知用户或次用户,secondary user,SU)或转移到另外一个频谱空穴,或继续使用该频段,但是要改变它的传输功率或调制方式以避免对主用户产生干扰,以实现动态频谱接入。可见,认知无线电的核心思想就是使无线通信设备具有发现“频谱空穴”并合理利用的能力。

1.2.1 认知无线电概念

认知无线电的概念最初是由 Joseph Mitola 博士于 1999 年提出的。此后,不同的研究者和研究机构从不同领域和角度给出了认知无线电的定义。其中有代表性的是 Mitola、FCC 和 Simon Haykin 教授的观点。Mitola 从软件无线电和人工智能的角度出发来理解认知无线电,FCC 从工业应用角度出发来认识认知无线电,而 Haykin 教授从信号处理的观点出发对认知无线电进行定义。

1. Mitola 的观点

Mitola 认为:认知无线电是建立在软件无线电(software defined radios, SDR)的基础上,基于模型推理的方式,通过无线电知识表示语言(radio knowledge representation language, RKRL)表述射频信号的各种参数(频率、功率等),以实现与网络的智能交流。Mitola 提出认知无线电是软件无线电的特殊扩展,以模型为基础进行有关用户和通信环境的推理。Mitola 在其博士论文中给出的无线认知环推理模型如图 1.3 所示^[5]。该图描述了认知无线电如何与外部环境进行信息交互,即外界激励进入观察认知环,利用感知的新状态和原状态得到响应的一个认知无线持续的观察、自身定位、制定计划、学习、决策并执行的流程。

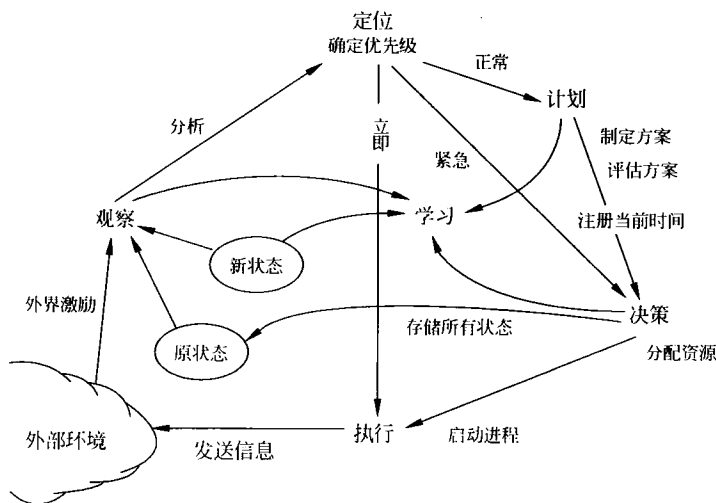


图 1.3 Mitola 的无线认知环推理模型

观察阶段: 认知无线电通过分析接收到的能提供环境辨识信息的信息流,观察它所处的环境,这些信息流主要包括无线电广播、短距无线广播等。此外认知无线电也通过读取测位、温度等传感器信息来推断用户的先后通信环境。

自身定位: 认知无线电可通过决定外界激励的优先级来对自己进行定位,比如,动力

故障能够直接引起执行阶段的反应,在图 1.3 中以“立即”表示;网络中信号不可恢复的丢失可能引起资源的重新分配,图中以“紧急”表示;正常情况下,认知无线电会对输入信息产生计划,图中以“正常”表示。

计划阶段:进行对偶然性事件的推理。

决策阶段:认知无线电从候选计划中作出最合适的选择。

执行阶段:触动选中的程序。

学习阶段:学习是观察和决策阶段的功能函数,比如,将当前和先前的内部状态与期望值进行比较,认知无线电就能够知道现在通信模型的有效性。

认知环将最终结果翻译成逻辑输出,送至传统的软件无线电,启动在特定时间内占据特定无线资源的任务。

2. FCC 的观点

对比 Joseph Mitola 对认知无线电技术的认识,FCC 定义的认知无线电更能被无线电研究者接受。FCC 认为,认知无线电是具有自适应频谱感知能力的无线电技术。2003 年 5 月,在 FCC 召开的认知无线电技术研讨会上,讨论了如何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^[6]:“认知无线电是指认知设备能够通过实时地与所处无线环境交互,改变发射机各项参数的无线电设备。认知无线电的主体可能是软件无线电(SDR),但对认知无线电设备而言,不一定必须具有软件或者现场可编程的要求。”

此外,文献[6]中还描述了认知无线电的 4 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主用户以可中断的方式向认知用户租借频谱;③利用用户的空间和时间特性动态协调频谱共享促进不同系统间的互操作;④利用发射功率控制和环境判决实现多跳射频网络。

3. Simon Haykin 的观点

2005 年,著名学者 Simon Haykin 教授对认知无线电进行了定义^[4],他从信号处理的观点认为:“认知无线电是一个智能的无线电通信系统,它可以对外界环境进行感知,并使用‘理解-构建’的方法从无线环境中学习,通过实时地改变某些参数(比如发射功率、载波频率和调制方式等),使系统内部状态适应它所接收到的无线信号的统计性变化,从而实现随时随地地高可靠性无线通信和对频谱资源的有效利用。”

同时,在这篇论文里,Simon Haykin 还根据这一定义,总结了认知无线电技术的三个关键问题:

- (1) 无线环境分析,包括无线环境中干扰温度的估计和频谱空穴的检测;
- (2) 信道状态估计与预测建模,包括信道状态信息的估计和信道容量的预计;
- (3) 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,给出了由这三个关键

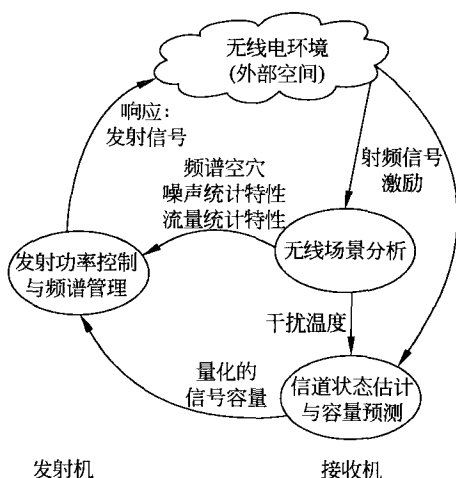


图 1.4 Simon Haykin 的认知环模型

问题构成的认知环模型,如图 1.4 所示。可以看出,认知无线电系统通过分析外部环境提供的激励来认识它通信的任务内容,然后对接收和发送的内容进行分析,再选择合适的解决方式,目的是为了实现通信的高可靠性和频谱的高利用率。这里描述的认知环模型较好地反映了认知无线电系统的实现机制。

4. 其他组织和学者的观点

ITU 采用了与 Mitola 提出的认知无线电类似的定义^[7],IEEE 和 SDR 工作组给出了与 FCC 类似的定义。而 John Notoor 博士认为,软件无线电不是认知无线电实现的必然条件,认知无线电也不是软件无线电的发展,它们之

间是一种相互重叠的关系^[8]。

综合上述观点,本书给出认知无线电的定义如下:认知无线电是一个智能的无线电通信系统,它通过与外界环境的交互而进行多维度频谱探测,在不对主用户造成干扰的情况下通过自适应调整发射机参数而实现与主用户的频谱共享。

1.2.2 认知无线电的能力

由认知无线电的定义可以看出,认知无线电应当具备的两大特征是:认知能力和重配置能力^[9]。认知无线电的最终目标是通过认知和重配置获得最好的可用频谱。

1. 认知能力

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(频谱空穴),决定适合的通信参数来自适应环境的无线频谱资源。认知能力通过频谱感知/侦听(spectrum sensing)、频谱分析(spectrum analysis)和频谱决策(spectrum decision)技术实现。

频谱感知:认知无线电通过有效的频谱探测以发现可用频谱并且探测主用户的出现。

频谱分析:估计频谱空穴的频谱特性。

频谱决策:根据可用频谱的特性和用户的服务质量(quality of service, QoS)需求,调整发射机传输参数并为当前的传输选择适合的运行频段。

然而,认知无线电环境是随时间和空间在不断变化的,因此必须自适应无线环境的变化。当有多个认知用户时,频谱共享机制可实现多个认知用户之间公平地共享频谱。当主用户出现、信道质量变差或者用户位置移动导致目前可用的频谱变得不可用时,频

谱移动性管理功能会将当前工作频率跳转到维持用户通信的频谱并实现无缝切换。

2. 重配置能力

重配置能力是指能够不改变任何硬件部分而调整载频、调制方式、传输功率等发射参数。

工作频率：认知无线电设备能够改变运行频率。认知无线电能够在探知到其他系统传输信号的基础上，动态地选择合适的工作频率。

调制方式：认知无线电能够根据可用频谱和用户需求选择合适的调制方式。另外，认知无线电也可应用一些新的调整方式，比如将信号分解成几部分，每一部分占据不连续的频带。

传输功率：认知无线电能够根据具体条件在限定的范围内调整传输功率。这些条件包括在某一空间内允许的最大传输功率、建立可靠通信链路需要的最低功率要求以及与其他设备的距离等。

通信技术：认知无线电可用来提供不同通信系统间的协同工作能力。

从认知能力来看，认知无线电看起来像信号处理和机器学习过程；从重配置能力来看，认知无线电像在执行通过认知能力获得的任务。

1.3 认知无线网络关键技术

认知无线网络是认知无线电的网络化，其本质是将认知特性纳入到无线通信网络的整体中去研究。认知无线网络以端对端性能为目标，它允许无线通信协议栈被动态重构，如图 1.5 所示^[9]；而认知无线电是以无线链路性能为目标，侧重于物理层和媒体接入层。认知无线网络所涵盖的研究内容非常丰富，涉及网络架构的设计、从物理层到应用层以及不同层间的跨层设计等多方面的关键技术，下面将对这些关键技术进行分析。

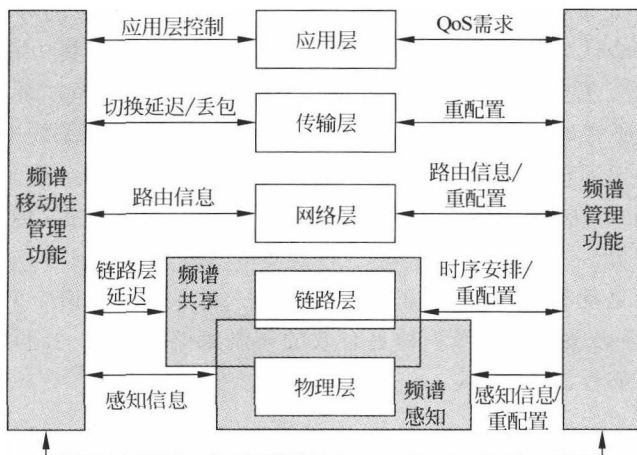


图 1.5 认知无线网络通信协议栈

1. 网络架构

由于认知无线网络中不同节点无线环境的异构性,系统总体和局部的可共享频谱资源随之发生变化,导致网络拓扑会不断变化,这就要求系统架构具有灵活适应网络拓扑变化的能力。根据目前对认知无线网络架构的研究成果可以看到,从最初的集中式网络架构,以及后来涌现的分布式、混合式网络架构,都有研究者在进行研究。集中式认知网络架构的典型代表为 IEEE 802.22 网络^[10],分布式网络架构的典型网络包括 IEEE 802.16h 网络^[11]与 Cognet 网络^[12],混合式网络架构的典型网络如 XG 网络^[13]和认知 Mesh 网络^[14]。

2. 动态频谱感知

频谱感知/检测功能主要在物理层实现。频谱感知是认知无线电应用的基础,主要功能是感知多维频谱空间(时间、频率、空间)的可用频谱,以辨识当前可用于传输数据的信道。认知用户相比主用户具有更低的频谱接入优先权。为了不对主用户的通信造成有害干扰,认知用户需能够独立地检测出空闲频谱及是否有主用户出现。这就要求认知用户能够实时地连续侦听频谱,以提高检测的可靠性。一个认知用户能够感知某个特殊的频段是否正被使用,若没有被使用,它就能占用此频段,且不会给相关的主用户造成有害干扰;若该频段的主用户之后又重新启动了传输,则该认知无线电可以跳转到另一个频段或者通过改变自身的发射功率等级和/或调制机制来避免造成干扰而继续使用该频段。

3. 动态频谱管理

动态频谱管理是为了选择最好的可用信道,它包括频谱分析和频谱决策。

频谱分析:在认知无线网络中,可用的频谱空穴在不同时间段内具有不同的频谱特征(中心频率、带宽等)。频谱分析就是用于归纳这些可用频段的频谱特性,使认知无线电能够做出最符合认知用户要求的判决。目前频谱分析主要集中在信道状态估计和预测、频谱容量估算、干扰、延迟、无线链路错误和占用时间分析等方面。

频谱决策:当所有可用频谱的特性都被分析出来以后,认知无线电需要在所有可以使用的频带中判决出通信效果最好的运行频段来满足用户的 QoS 要求。根据用户的要求可以决定传输模式(传输波形、调制方式、多址方式等)、最大延迟、传输带宽、可接受的误码率和传输速率等。

频谱管理必须是动态的、自适应的。例如,当一组可用的频谱空穴不能达到用户需求时,动态频谱管理必须能够选择一种更有效的调制策略或者另一组可用的频谱空穴以提高无线通信的可靠性。

4. 动态频谱共享

频谱共享可看做是媒体接入控制(media access control, MAC)层技术,包括动态

频谱分配和动态频谱接入。它主要解决认知用户之间或认知用户和主用户之间协同接入可用信道的方式,本质上是一种多目标优化问题。

动态频谱分配广泛采用的研究工具和方法包括图论、博弈论与微观经济学理论。图论是将频谱分配问题建模为图论中的图着色问题,以此开发优化机制来处理各种网络架构下的频谱利用、公平性与吞吐量问题^[15,16];博弈论将认知用户间的行为构建为一个博弈模型,从而利用博弈论的相关理论分析合作、非合作等不同行为模式下的最佳分配策略^[17~19];微观经济学是利用其拍卖理论实现频谱租赁^[20,21]。

认知无线电实现频谱共享的前提是必须保证不影响主用户的正常通信,而认知用户的发射功率是造成干扰的主要原因,因此必须控制其发射功率,以避免对主用户造成干扰。针对认知无线电的特点,在经典注水算法的基础上,一般主要采用信息论和博弈论来解决功率控制难题。功率控制技术也成为认知无线网络的关键技术之一。

5. 频谱移动性管理

频谱移动性是用户在通信过程中改变自身运行频率的过程,其主要问题是频谱切换。认知用户是靠临时出现的频谱空穴进行通信的,由于主用户的出现、离开,以及外界干扰造成信道质量下降都会引起可用频谱的移动,认知用户要想维持自己不间断的通信服务,必须进行相应的频谱切换。

当认知用户改变自身工作频率的时候,网络协议将从一种工作状态转变成另一种工作状态。由于频谱切换可能会带来信道接入延迟,导致通信中断,频谱移动性管理的目的就是使网络状态变化尽可能快和平滑地进行,确保在这样的频谱切换中最大限度地降低用户的业务性能损失。为此,频谱移动性管理协议有必要预知一个频谱切换动作的持续时间及可供切换的频谱资源分布过程,该过程需要同底层的频谱检测算法相结合,将可用频谱信息利用数学工具建立行为预测模型,供上层频谱管理算法查询使用。因此,实现上述频谱切换的功能需要一个多层的频谱移动性管理协议来支持,使频谱管理功能适应多种类型的应用业务。

频谱移动性管理是认知无线电领域尚未进行深入研究的领域。

可以看出,动态频谱感知、动态频谱管理、频谱共享以及频谱移动性管理共同构成了从物理层、MAC层到网络层甚至更高层的技术内涵。

6. 跨层设计

非相邻层间的直接通信或不同层间的信息共享都可以归结到跨层设计的范畴。认知无线网络面临多目标之间的折中,这种折中可以通过跨层设计来实现。跨层设计是认知无线网络中协议设计的一个重要方向,由于认知无线网络中各个节点的可用频谱资源具有差异性和动态性,与传统的网络中可用频率是固定的不同,因此需要联合协议栈中的多层来进行设计,以获得较好的性能。

从目前的研究来看,认知无线网络中的跨层设计主要涉及两大方面的内容:①物理层与MAC层的跨层设计,如基于功率控制^[22]、基于频谱感知信息来进行频谱接入和