

博弈论视角的 认知无线网络

曾碧卿 邓会敏 张 翊 著



科学出版社

博弈论视角的认知无线网络

Cognitive Radio Networks: A Game Theoretic View

曾碧卿 邓会敏 张 翹 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

认知无线网络(CRN)高效利用贫乏的频谱资源,对传统的固定频谱分配机制具有革命性意义。该领域最新的研究中,博弈论已被作为一种通用模型广泛应用于认知无线网络中。本书将从经济学理论中的博弈论视角,全面而系统地介绍认知无线网络和最新的研究成果。本书首先概述认知无线网络发展背景、频谱共享和博弈论的基础理论,分别基于非合作博弈、经济学博弈、合作博弈、随机博弈和动态博弈模型展开对于认知无线网络中频谱分配、功率控制和定价等关键问题的探讨。

本书可供研究认知无线网络及下一代网络技术的专业技术人员、管理人员,特别是从事该方向理论研究、模型设计和算法设计的人员阅读;同时,也对学习和研究认知无线网络、物联网及相关专业方向的研究生等有较大的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

博弈论视角下的认知无线网络/曹碧卿,邓会敏,张翅著. —北京:科学出版社, 2015.7

ISBN 978-7-03-044968-9

I. ①博… II. ①曹…②邓…③张… III. ①无线电通信-通信网 IV. ①TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 130077 号

责任编辑:黄 海/责任校对:蒋 萍

责任印制:赵 博/封面设计:许 瑞

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>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 7 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 7 月第一次印刷 印张:13 1/4

字数:270 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

目 录

第一部分 认知无线网络与博弈论概述

1 认知无线网络	3
1.1 引言	3
1.2 认知无线电概述	5
1.2.1 软件定义无线电	6
1.2.2 认知无线电	8
1.2.3 认知无线电组件和协议	9
1.3 认知无线网络体系结构	11
1.4 频谱感知	14
1.4.1 单点感知技术	15
1.4.2 协作感知技术	17
1.5 动态频谱共享	18
1.5.1 频谱共享的分类	18
1.5.2 基于博弈论的频谱共享研究现状	20
1.6 认知无线网络的应用	23
1.6.1 CRN 的应用领域	23
1.6.2 CRN 的研究现状	24
2 博弈论	26
2.1 博弈论基础	26
2.2 非合作博弈	30
2.2.1 战略形式的博弈	31
2.2.2 扩展形式的博弈	33
2.2.3 特殊形式的博弈	38
2.3 合作博弈	43
2.3.1 议价博弈	43
2.3.2 联盟博弈	45
2.4 贝叶斯博弈	47
2.4.1 不完美信息与贝叶斯博弈基础	47

2.4.2 贝叶斯博弈期望收益	49
2.4.3 贝叶斯纳什均衡	50
3 经济学与博弈论	52
3.1 市场与市场均衡	52
3.2 寡头市场	53
3.3 频谱定价	55
3.4 拍卖理论	56
3.5 贸易	58
参考文献	58

第二部分 非合作博弈与频谱共享

4 基于势博弈频谱共享	65
4.1 波形选择和功率控制	65
4.2 基于势博弈的频谱分配	68
5 基于重复博弈的频谱共享	72
5.1 功率控制	72
5.2 频谱分配	74
5.3 合作和最优检测	75
6 基于随机博弈的频谱共享	79
6.1 时变环境频谱共享	79
6.1.1 系统模型	79
6.1.2 竞拍机制	81
6.1.3 用户模型与随机博弈框架	82
6.1.4 随机博弈与频谱出价	84
6.1.5 基于迭代学习的频谱管理博弈	85
6.1.6 学习算法复杂度	88
6.2 干扰环境频谱共享	89
6.2.1 系统模型	89
6.2.2 随机抗干扰博弈模型	91
6.2.3 求解随机博弈的最优解决方案	96
7 基于相关均衡的频谱共享	100
7.1 动态频谱分配	100
7.2 动态频谱接入	103
参考文献	109

第三部分 合作博弈与频谱分配

8 议价博弈	113
8.1 分布式功率控制	113
8.2 基于需求的频谱分配模型	115
8.2.1 系统模型	116
8.2.2 第 0 层调度	116
8.2.3 第 1 层调度	118
8.3 联合信道和功率分配调度	120
8.3.1 系统模型	120
8.3.2 频谱分配问题的构造	122
8.3.3 最优资源调度策略	123
9 联盟博弈	127
9.1 分布式协作感知	127
9.2 多用户频谱分配	131
9.3 合作频谱接入模型	135
参考文献	142

第四部分 经济学、博弈与频谱定价

10 定价与功率控制	147
10.1 增益后功率的定价	147
10.2 上行功率控制与频谱定价	151
11 基于寡头市场的频谱交易与带宽分配	154
11.1 1- M 模型	154
11.2 M -1 模型	156
12 基于定价的功率控制和带宽分配	159
12.1 联合功率控制和带宽分配的分层模型	159
12.1.1 系统模型	159
12.1.2 第 1 层频谱定价与带宽分配	160
12.1.3 第 2 层频谱定价与功率分配	161
12.2 面向功率控制的频谱交易	165
12.2.1 系统模型	165
12.2.2 频谱定价和资源分配	167
12.2.3 仿真实验	173

13 面向次网络通信需求的频谱定价与分配	177
13.1 系统模型	177
13.2 第一阶段: 频谱定价与需求	178
13.2.1 次基站效用和需求函数	178
13.2.2 主基站效用和 Bertrand 博弈	180
13.2.3 动态 Bertrand 博弈	181
13.2.4 动态博弈稳定性分析	182
13.2.5 频谱需求调整和系统调度	183
13.3 第二阶段: 合作频谱共享	184
13.3.1 议价博弈模型	184
13.3.2 子载波和功率最优分配	185
13.4 仿真实验	189
13.4.1 频谱定价与分配	189
13.4.2 合作频谱共享	192
14 基于重复拍卖和非参数贝叶斯学习的频谱接入	196
14.1 系统模型	196
14.2 重复拍卖博弈的构造	197
14.3 非参数贝叶斯机制	201
参考文献	204
术语中英对照	205

第一部分 认知无线网络与博弈论概述

当前，在对有限且宝贵的频谱资源的管理上，不论是我国的统一授权模式，还是美国的命令与控制模式，这些传统的静态频谱管理模式，在面对多接入方式并存、多节点协作和智能化感知的当今网络时遭遇了瓶颈。追求不同设备间的通信干扰最小化、频谱利用率最大化的动态频谱管理模式，开始走上历史舞台。认知无线网络作为推动这一变革的通信范例，已成为国内外学者的研究热点。相关的研究中，博弈论已被作为一种非常理想且通用的理论工具，广泛应用于认知无线网络用户间交互行为的建模、分析和设计高效的共享策略。

本篇涵盖全书的基础章节，为下文提供最基础的概念和理论框架。第 1 章详细介绍了认知无线网络的产生背景、相关技术和研究现状，使读者对该领域所要研究的内容形成清晰的轮廓；第 2、3 章针对当前认知无线网络研究工作中涉及的博弈论和相关经济学理论，在构建完整的理论体系基础之上，阐述相应的基础概念和模型，为读者阅读后面的章节提供理论参考。

1 认知无线网络

1.1 引言

现通信系统使用频率范围在 3Hz~300GHz 的无线电波作为传输介质。无线电频谱之于射频通信，如同鱼所赖以生存的水，没有频谱，射频通信无从说起，无线通信系统更无从说起，正如 Preston Marshall 和 B. A. Fette^[1]所说的“频谱是射频通信的生命线”。不同频率的无线电波有着不同的传播特性，并适用于特定的无线应用与服务，例如高频无线电波适合短距离、高速通信，低频无线电波则适合长距离通信。运用于无线通信的频谱主要可分为表 1-1 中的几个频带。

多个设备如果同时使用同一频段进行信号传输，就难免会受到彼此的干扰。各国的无线频谱管理机构通过有效的频谱管理避免这类问题的发生。传统的管理模式是由美国联邦通信委员会(FCC)定义的“命令与控制模式”。在命令与控制模式中，无线频谱管理机构通常以频谱拍卖的方法进行频谱划分，将无线电波某一频段授权给已获批准的公司或用户。除命令与控制模式管理的授权频段外，还存在一些保留给工业、科学和医学的 ISM 频段(如：6.78MHz±0.015MHz，2.45GHz±50MHz，61.25GHz±250MHz 等)，这些频段也可以进行数据传输，但由于管理机构对这些频段没有过多的控制，通过 ISM 频段进行的数据传输都可能会遭受干扰。

表 1-1 无线电频带

带号	频带名称	频率范围	波段名称	波长范围	用法
1	极低频(ELF)	3Hz~30Hz	极长波	100Mm~10Mm	潜艇通信或直接转换成声音
2	超低频(SLF)	30Hz~300Hz	超长波	10Mm~1Mm	直接转换成声音或交流输电系统
3	特低频(ULF)	300Hz~3kHz	特长波	1000km~100km	矿场通信或直接转换成声音
4	甚低频(VLF)	3kHz~30kHz	甚长波	100km~10km	直接转换成声音，超声、地球物理学研究
5	低频(LF)	30kHz~300kHz	长波	10km~1km	国际广播、全向信标
6	中频(MF)	300kHz~3MHz	中波	1000m~100m	调幅(AM)广播，全向信标、海事及航空通信
7	高频(HF)	3MHz~30MHz	短波	100m~10m	短波、民用电台
8	甚高频(VHF)	30MHz~300MHz	米波	10m~1m	调频(FM)广播、电视广播、航空通信
9	特高频(UHF)	300MHz~3GHz	分米波	10dm~1dm	电视广播，1G、2G 无线电话通信，微波炉
10	超高频(SHF)	3GHz~30GHz	厘米波	10cm~1cm	无线网络、雷达、人造卫星接收
11	极高频(EHF)	30GHz~300GHz	毫米波	10mm~1mm	射电天文学、遥感、人体扫描安检仪

图 1-1 给出了美国国家电信与信息管理局(NTIA)在 2011 年 8 月颁布的频谱分配方案^[3]。我国是由国家无线电管理委员会(SRRC)统一授权使用,无线电频率的划分区分为“中国内地”“中国香港”“中国澳门”三部分内容,详细可参照《中国频谱管理》^[4]。

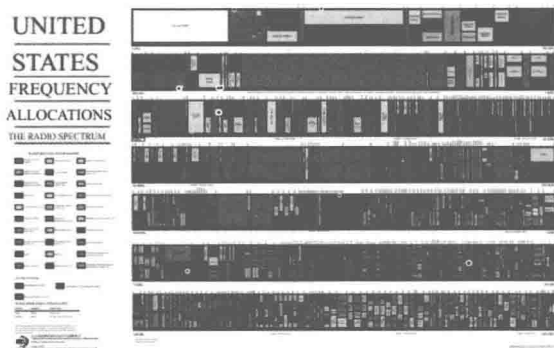


图 1-1 NTIA 固定频谱分配图

对于上述两种静态的频谱管理模式,授权用户接入指定频谱需要遵从一系列的规范(如:使用类型、地理位置、频率、功率等),频谱接入受到以下限制:

- (1) 授权区域广:通常授权使用的区域范围为一个国家或一个州;
- (2) 授权频段宽:通常被授权以一段较宽的频段(如:50MHz),用在特定区域满足负载峰值的需求。

然而,由于追求投资回报率等原因,无线服务提供商只占用部分频段在一定的子区域中进行通信,这导致了频谱的大面积空闲。不仅如此,频谱接入还受到以下限制:

- (1) 固定的频谱使用类型:例如,授权给基于 NTSC 的模拟电视信号传输的频段,不能够用作传输数字电视广播和宽带无线接入,然而这些频段在很多地理位置,由于有线电视系统的原因,依然处于大面积空闲状态。
- (2) 禁止非授权用户访问授权频带:为保证已授权公司或用户对其拍得的频段有绝对的使用权,使其通信不受其他未授权用户的干扰,禁止非授权用户使用已授权频谱,即使该段频谱当前并未被占用。例如,在工作时段,蜂窝网络或电视信号传输所使用的频段被高效地使用,但在午夜至清晨几乎处于空闲状态,这种情况下其他用户也无法使用该频段进行通信。

这些限制使得用户或无线服务提供商不能在动态的频谱环境中对传输频段进行适应性的调整,导致频谱在不同频域、时域和空域上的使用都极不平衡^[5,6],如图 1-2 所示,大部分的频谱资源并未被有效使用。此外,随着大量新的设备和应用的不断部署,服务类型和需求日趋多样化,频谱资源划分几乎殆尽,这种静态

的、缺乏灵活性的频谱管理模式已经成为制约频谱高效利用的瓶颈,无线通信网络面临着巨大的挑战。这迫使频谱管理机构重新审视这一分配机制,并寻找革新的通信技术,使得频谱以一种智能的、高效的方式被利用。目前,FCC已允许非授权设备使用当前未被授权用户占用的部分开放频段^[7]。另一方面,软件定义无线电技术日趋成熟,它是一个可重构的无线传输系统,采用固定不变的硬件平台,通过信号处理算法动态地调整传输参数(如:频带、调制模式),通过软件重构(升级)来实现灵活多变的通信标准和通信功能的无线电系统。

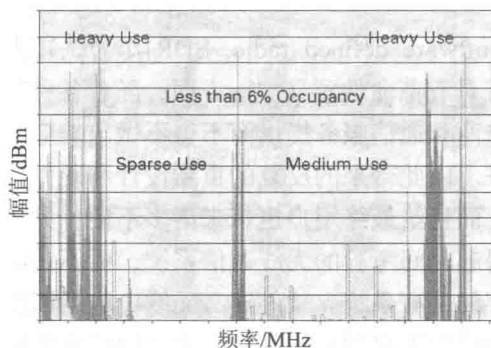


图 1-2 频谱利用率^[2]

一种新的频谱管理模式需要同时考虑技术高效和经济高效。技术高效在于追求不同设备间的通信干扰最小化和频谱利用率的最大化,动态频谱接入模型应运而生,从而使得未获授权用户或公司,被允许临时使用当前空闲的频段,同时保证授权用户不受干扰。经济高效考虑授权用户的收入和赔偿,并将经济学模型整合到频谱管理模式中,定价模型作为解决经济高效问题的策略之一,使得授权用户或服务提供商通过竞争或合作给频段予以定价,租用给其他用户以获得最大收入。更多频谱管理模型可参考文献[8],这些频谱管理模型提高了频谱利用的灵活性,然而,由于遗留的无线电系统都被设计工作在专有的频段上,并不能在新的管理模式下有效地利用这种灵活性,这便为高效利用频谱的无线通信技术创造了广阔的需求空间。在这样的背景下,认知无线电(cognitive radio, CR)^[9]的概念开始进入人们的视野,认知无线电技术作为部署在收、发终端上实现高效的动态频谱接入技术,逐渐走到无线通信时代的前列。目前美国联邦通信委员会已经考虑利用认知无线电技术来更加灵活和广泛地使用可用频谱。

1.2 认知无线电概述

通常认知无线电系统中包含两类用户:主用户(primary user, PU)和次用户(secondary user, SU)。主用户,也就是传统无线电系统中的授权用户,是授权频段

的拥有者；次用户，即部署有认知无线电技术的非授权用户(又称认知用户)，以机会的方式接入频谱。次用户通过与所处的无线电环境进行交互，动态地感知频谱状态和主用户工作状态，并通过自适应地调整工作参数，使得自身在不对主用户造成干扰的前提下充分利用频谱。认知无线电系统就是以这样一种频谱共享的方式，弥补由于静态频谱管理机制所导致资源利用率不高的问题。这对缓解频谱资源紧缺现状，为网络节点提供快速、可信的无线通信具有非常重要的意义。

1.2.1 软件定义无线电

软件定义无线电(software defined radio, SDR)作为认知无线电中一个重要组件^[10]，对无线通信系统具有革命性意义。一方面，随着各种新标准、新协议的不断发布，无线系统制造商和通信服务提供商不得不做出响应，通过系统升级，以提供高质量的通信服务。由此带来的反复的重新设计和硬件的更新换代，不仅成本高，造成资源浪费，而且给最终用户也带来诸多不便。另一方面，服务提供商和最终用户关注能经得起时间考验的无线通信系统，而不是随着技术的发展，不断地面临被淘汰、废弃的现有系统。软件定义无线电应运而生，它是一个可重构的无线传输系统，采用固定不变的硬件平台，通过信号处理算法动态地调整传输参数，通过软件重构/升级实现灵活多变的通信标准和通信功能。主要功能可概括为^[11]：

(1) 多频段传输。SDR 支持在被不同无线接入系统使用的频谱(如蜂窝频段、ISM 频段、电视频段)上进行数据传输。

(2) 多标准支持。SDR 不仅支持不同通信标准下传输，例如 GSM、WCDMA、CDMA2000、WiMAX、WiFi，而且支持统一标准下不同无线接入技术(也称空中接口)的传输，例如 WiFi 标准中的 IEEE 802.11a、802.11b、802.11g 和 802.11n。

(3) 多服务支持。SDR 支持多种类型的服务，例如蜂窝电话和宽带无线接入；

(4) 多信道支持。SDR 还可以同时利用多个频带进行数据传输。

通常的 SDR 收发器主要由天线、射频前端、模拟/数字转换器、基带处理单元和数据处理器组成，工作原理如图 1-3 所示。射频前端(图 1-4)将天线接收到的模拟信号，通过过滤、放大、混频等一系列的操作，获得目标频率的信号。模拟/数字转换器通过信号采样，进行模拟信号和数字信号的相互转换，采样速率既要满足 Nyquist 定理，又要尽可能地小以减少信号处理的负载。基带处理单元将信号进行调制/解调、编码/解码。这样看来，SDR 大部分组件和传统的无线电收发器没什么两样，仅存在两点区别：



图 1-3 SDR 收发器工作原理

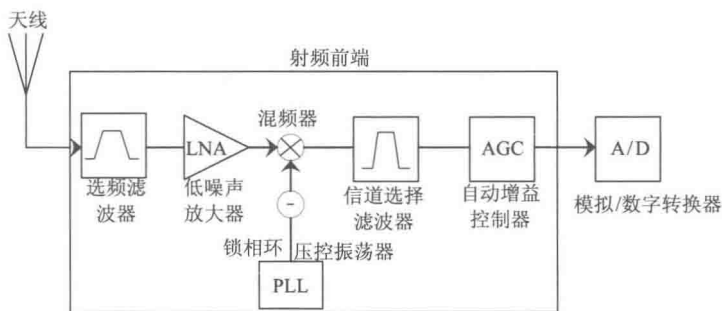


图 1-4 SDR 射频前端

(1) SDR 采用宽频带天线和射频硬件(如功率放大器和自适应滤波器),使得 SDR 能够在非常广的频谱范围内调谐,并且能够实时测量所处无线电环境的频谱信息;

(2) 每一个组件都可以被上层的组件进行控制,或者通过认知无线电模块进行重构,工作参数,包括采样速率、模拟和数字过滤器以及信号处理的算法,都可以根据 SDR 当前传输的频段和所采用的无线接入技术进行配置,以适应动态变化的射频环境。

SDR 根据通信规范和需求,可以大致分为以下几类^[11]:

(1) SDR 收发器参数(如:操作标准,运行频段)在交付给顾客前已被设置,系统部署后不得修改,尽管此类型的动态可配置性被取缔,一种 SDR 收发器模型仍然可出售给不同需求的用户;

(2) SDR 收发器参数可被不定期的修改,例如当网络结构发生变化或新增一个基站的时候;

(3) SDR 收发器参数可基于连接进行修改,例如当用户创建一个无线连接时,收发器可以基于网络可行性、性能和价格选择不同通信标准的无线接入网(如 GSM、WiFi 或 WiMAX);

(4) SDR 收发器参数可在任意时隙动态修改,例如当干扰水平增加时,可以增加传输功率,或者授权用户回到授权频段上时,非授权用户可以调整传输频段。

软件定义无线电因其硬件平台通用化、标准化、模块化以及对信号波形的广泛适应性,内部软件可升级、可重构的以适应不同的技术标准、接口协议和信号波形,在通信领域一经提出,就得到了包括雷达、电子战、卫星载荷等多个无线

电气工程领域的广泛关注。

1.2.2 认知无线电

认知无线电技术是以动态方式接入频谱的核心技术。Simon Haykin 和 Ekram Hossain 等^[10, 12]对于认知无线电的定义是:认知无线电是一种能够感知周边环境的智能无线通信系统,它能够从环境中学习,并通过实时、在线的方式调整传输参数,使得内部状态适应当前所受射频刺激的统计性变化,从而实现:任何时间、任何地理位置的高可靠通信和无线电频谱的高效利用。

根据定义,可以归纳出认知无线电的两个重要特性^[12,13]。

(1) 认知特性。认知特性使得认知无线电能够实时地与环境进行交互,感知无线电环境在时间、空间维度的变化,从而选择合适的传输参数以适应动态无线电环境。这一过程被很多学者称作认知环(cognitive cycle)^[10,12,14],如图 1-5 所示,其功能包括:

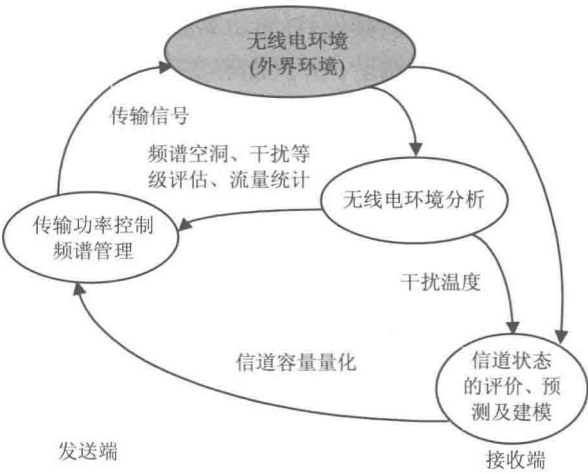


图 1-5 认知环

- ① 频谱感知。包括评估无线电环境的干扰温度(interference temperature, 图1-6)和侦测频谱空洞(spectrum holes, 图 1-7),即某一时刻/某一位置未被使用的频谱。
- ② 频谱分析。分析感知到的信息,获取有关频谱空洞和干扰温度的知识。包括信道状态信息、干扰、感知出错情况下的冲突可能性评估、信道容量预测等。
- ③ 频谱决策。根据用户需求和频谱特征选择合适频段,决定传输数据速率、传输模式、带宽、功率等,实现频谱接入和频谱迁移。

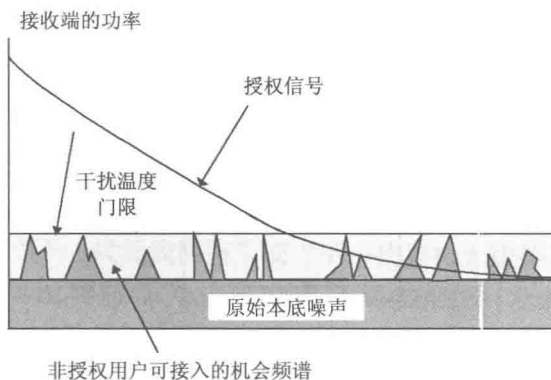


图 1-6 干扰温度模型

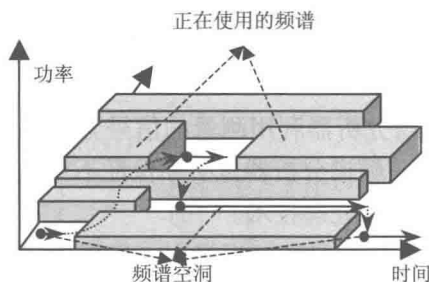


图 1-7 频谱空洞

因为周边的无线电环境随着时间和地理位置可发生变化，当决定使用某个频段进行数据传输之后，仍然需要对无线电环境进行跟踪。例如当发现由于主用户出现、用户移动和流量变化使得当前使用的频段不可用时，立即使用频谱迁移功能：将次用户的工作频段切换到其他可用频段，实现无缝传输。

(2) 可重构性。利用软件定义无线电技术，在硬件平台不做任何调整的情况下，实时、在线地调节工作参数，这个特性使得认知无线电在适应时刻变化的无线电环境中游刃有余。可重构参数包括：工作频率、调制模式、传输功率和通信技术等。参数的重配置不仅发生在传输的开始阶段，而且贯穿整个传输过程。可重构性是实现认知特性的基础。

1.2.3 认知无线电组件和协议

在上一节我们已经提到了认知环的概念，认知环中涉及功能由认知无线电收发器中不同的组件得以实现，如图 1-8 所示。

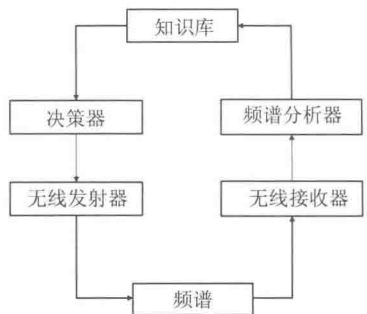


图 1-8 认知无线电节点组件

- (1) 接收器/发射器。也称收发器，基于软件定义无线电技术的无线收发器是认知无线电节点主要组件之一，负责数据信号的传输和接收。此外，接收器还被用来观察指定频谱上主用户的工作状态(频谱感知)。认知无线电节点的运行参数根据高层协议指令动态调整。
- (2) 频谱分析器。频谱分析器利用测量的信号分析频谱利用情况。在次用户利用授权频段进行传输时，频谱分析器也必须保证不对主用户的传输造成干扰。这些过程可同时涉及多种信号处理技术。
- (3) 知识库。知识库负责学习和知识提取，运用由分析器获取到的频谱利用情况去理解周围的无线电环境，所提取的知识随后被用于传输参数的优化。这一过程涉及人工智能领域中的机器学习算法。
- (4) 决策器。当获取到频谱利用情况的知识后，决策器便负责频谱接入的决策。这个决策是在综合考量无线电环境、次用户的合作/非合作的关系，并利用相应理论建模，所获得的最优决策。例如，当系统只有一个实体和一个目标时，利用优化理论建模；当系统中包含多个不同目标的实体时，利用博弈论进行建模；当系统状态具有一定的随机性时，利用随机优化理论进行建模。

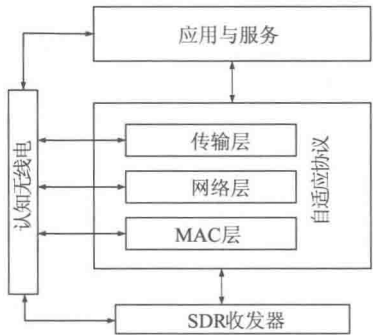


图 1-9 认知无线电协议栈

文献[10]中给出了认知无线电的协议栈，如图 1-9 所示。其物理层由软件定义无线电实现，数据链路层、网络层、传输层和应用层中的自适应协议感知周边无线环境的变化，尤其是考虑主用户的通信活动、次用户的通信需求和信道质量的变化等。认知无线电控制模块建立与各层之间的联系，利用智能算法处理从物理层获得测量信号，接收来自应用层的通信需求信息，以控制各层的协议参数。这方面的研究内容主要集中在跨层设计，更多内容可参考文献[15]。