

第1章 认知无线电概论

1.1 概述

频谱资源匮乏是现代通信系统正面临的巨大挑战之一。日益增加的无线电频谱需求和频谱管理部门死板的静态频谱分配方法导致频谱利用率低下,如何提高现有授权频段的利用率正成为一个主要问题。认知无线电(CR)已成为最有前途的解决频谱短缺和利用效率低下的一种方式。认知无线电的基本思想是当频段的授权用户(主用户,PU)不使用该频段或非授权用户(次用户,SU)对主用户的干扰低于一定阈值时,非授权用户可以使用该频段。因此,在网络中引入认知的概念,可以提高频谱利用率。

认知意味着电台了解它所处的环境,并根据获得的无线信道情况调整操作参数。只有这样,电台才能灵活地利用可能为空的授权波段。认知网络的认知性和敏捷性取决于网络的学习、参数调整和决策能力。

本章提出了认知无线网络(CRN)的基本概念;1.2节介绍认知周期;1.3节讨论认知无线电框架的功能;1.4节提出了认知无线电的接入方式;最后,第1.5节给出了全书的概述。

1.2 认知无线网络架构

认知无线电架构建立在网络中不同实体之间的交互、实体与周围环境交互的基础之上。每个实体都作为认知实体出现在网络中,代替纯粹的中心控制网络或预定义通信规则网络。认知无线电架构的目的是,基于每个实体对网络情况和所处环境的自适应,进而更好地利用资源和管理相应行为。

跨层设计能使节点在做决策时使用相关信息来优化不同的协议,从而提高网络性能。然而,这种方法有其局限性,它无法优化多个目标,也无法从周围环境中学习相关信息。因此,需要一种经过改进的智能新技术来进行学习和规划。认知是一种感知、推理以达到认识的学习过程。

认知无线网络是一种有自我感知、自我组织的智能自适应网络。自适应机制会在网络节点观察网络状态、共享跨层信息以及学习、推理相关信息的过程中启动,从而制定和执行优化决策。

认知无线电在研究领域迅速获得重视是因为该技术能让网络更智能、更优化。认知周期的概念首先出现在文献[1]中,它总结了认知无线电工作过程中的主要步骤(见图1.1)。认知循环能够通过学习和共享不同网络实体间的信息来实现智能自适应。认知无线电周期包括6个主要元素:

- 环境 包括网络环境和网络周围环境,如物理信道、其他用户、设备、网络等一切能影响到当前网络状态的东西(如天气状况、障碍物、经济指标和交易规则等)。

- **感知** 不同的认知无线电实体感知和监视环境。环境信息包括频谱带宽、干扰程度、物理传播信道参数以及主用户与次用户的位置。
- **规划** 次用户制定多种规划并在决策前评估这些规划。
- **决策** 基于知识和学习制定决策、优化系统资源。
- **行动** 基于决策，次用户可以通过一系列行动影响环境，如媒体接入、路由、资源分配、修改传输计划等。
- **学习** 学习是认知周期中的核心部分。配备知识库和学习工具，节点能够追踪所有与网络和网络环境有关的信息。学习能力使系统能够根据当前和过去的行为，预测未来的行动，并在规划和决策制定过程中更智能地加以运用。

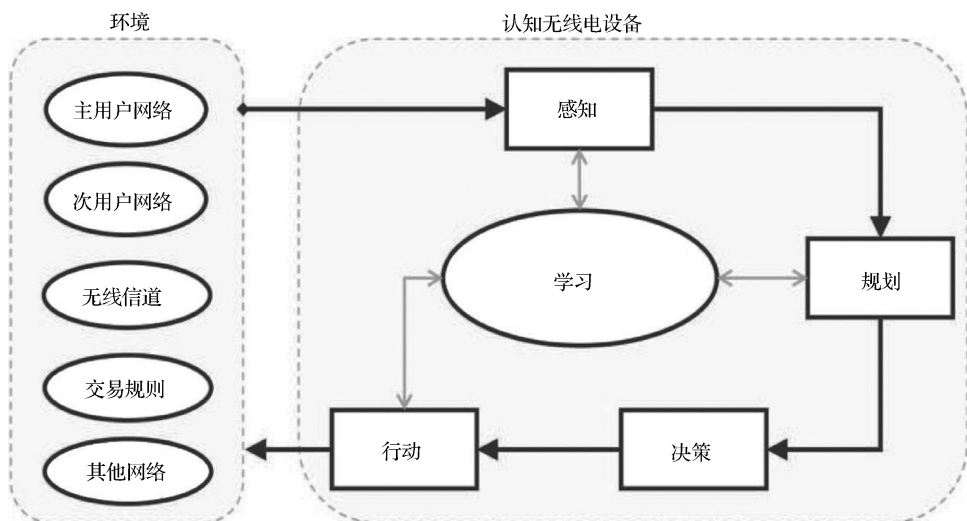


图 1.1 认知无线电周期

认知无线电定义

认知无线电系统的定义如下所示^[2]：

认知无线电系统整合多项技术，使其能够获取自身操作信息、地理环境信息、既定策略和内部状态；根据已有的知识不断自动调整自身操作参数和协议来实现预定目标，并从结果中进行再学习。

和传统的无线电相比，认知无线电系统的主要特征是动态频谱接入，而非墨守静态的频谱分配方法。从广义角度来讲，动态频谱接入被分为如下三类^[3]。

- **动态专用模式** 这种模式遵循当前的频谱调控政策，授权频谱是由当前授权用户专用的，但授权用户可出售、共享或与其他各方交易频谱产权。
- **频谱公用模式** 这种模式发展的基础是非授权的工业、科学和医疗（ISM）频段的成功应用，如 WiFi。该模式允许向所有接受既定标准的用户开放频谱共享。
- **分层访问模式** 基于主用户和次用户的分层访问结构。这种模式隐含的理念是，只要不造成对主用户的干扰，次用户可利用未占用信道。该模式可以进一步被分为独立模

式(换言之,不共享网络信息)和合作模式(亦即参与频谱信息共享以获得更好的优化频谱接入)。

尽管这些接入模式有本质的不同,但它们都力求达到同样的目的:提高频谱利用率,这也是认知无线电具有的潜在优势之一。认知无线网络还有其他优势:

- 提高无线链路的性能 认知无线网络可以通过优化分配给次用户的资源(如信道、功率、速率、调制方式和编码方案等)来提高无线链路性能。
- 限制干扰 认知无线网络可以通过动态频谱接入和自适应资源分配减少次用户对主用户的干扰。
- 平衡流量 认知无线网络可以帮助主用户将网络流量从密集频段转移到其他未被占用的频段。例如,当一个蜂窝网络出现高负荷时,认知无线电能帮助网络伺机将部分负载转移到其他可用频段。
- 协助主用户 认知无线电可以与主用户合作,协助其从发射机到接收机之间的信息中继。

1.3 认知无线电架构的功能

传统无线模式的特征是静态频谱分配策略,政府机构将频谱分配给按地域分布的授权用户长期使用。认知无线网络通过异构无线网络架构和动态频谱接入技术,使次用户和主用户能够共用频谱,有望改变传统无线模式。因此,认知无线网络中的每个次用户都必须能够可靠执行以下任务:

- 确定频谱中哪些部分(信道)可用
- 选择最佳的可用信道
- 与其他用户合作访问此信道
- 当主用户开始使用此信道或对主用户的干扰程度超过预定阈值时让出信道
- 与其他用户合作提高网络或用户的效率(可选)

从这些任务中,能推断出次用户必须具备下列特征^[4]:

- 认知能力 为了提供可靠通信、提高频谱利用率,认知无线电必须能够认知周围环境并智能调整其参数。
- 重构能力 认知无线电必须能够适当调整其运行参数,如发射功率、调制技术和路由方案,以提高频谱利用率,并限制对主用户网络的干扰。

1.3.1 收发器结构

一个典型的认知无线电收发器包含两个关键部分:射频前端和基带处理单元,如图1.2所示^[5]。在射频前端,认知无线电必须是一种宽带架构,能够监测大范围的频谱。例如,宽带天线经调谐能在多频带上捕获主用户发出的信号,然后处理被检测到的频段以确定是否可用。如果有可用信道,用户可以调整该信道的参数(如传输频率,调制方式等),并在该信道上传输信号。

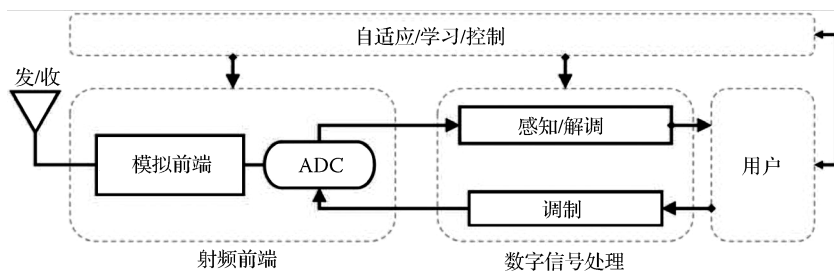


图 1.2 典型的认知无线电收发器模块

1.3.2 设计面临的主要挑战

由于不同类型的用户共存，他们对服务质量(QoS)的要求也不同，认知无线电架构在每一个抽象层次上的设计都面临着挑战。比如，为保证次用户不干扰主用户，次用户必须时刻监测主用户信号，包括主用户发出的非常微弱的信号。由于无线信道的随机性，这个过程非常困难。此外，当主用户返回时，次用户必须立即离开该信道，这就要求次用户进行定期的信道监测。这样一来，数据传输中断就难以避免，对次用户服务质量的支持可能无法得到保证。那么仅有的选择就是保证次用户能够流畅地从一个信道切换到另一个信道。常规切换技术无法在认知无线电环境下很好地工作。在认知无线网络中，切换过程通常在主用户返回时开始，因为不能预测主用户的行为，这个过程具有相当的挑战性。除了上述的挑战之外，一些设计上的问题也亟待探讨，比如大动态范围内弱信号的监测、载波的产生、多频带感知和重新配置等问题^[5,6]。

1.3.3 频谱管理进程的功能

由于认知无线电架构面临的独特挑战，运用恰当的管理进程来应对这些挑战就显得至关重要。一般来说，完整的频谱管理进程由4个要素构成(见图1.3)^[5]。

1. 频谱检测和感知 次用户必须了解频谱占用情况。被探测到的信道是空置的，还是已被主用户占用，可以通过局部频谱探测来加以确定^[7~10]。
2. 频谱决策 次用户必须决定是否需要访问一个信道。这个重要的决策不仅取决于频谱检测的结果，而且与服务质量要求以及其他内部与外部策略有关。
3. 频谱共享 次用户必须和其他次用户合作，共享可用频谱资源，避免干扰主用户。因此，介质访问控制(MAC)协议和功能必须与频谱检测进程一起运行^[11,12]。这个功能包括了频谱共享和频谱交易的经济模型。
4. 频谱迁移 与传统无线通信系统不同，认知无线网络中的信道切换不仅是由次用户的迁移引起的，还受到主用户行为的影响。因此，当主用户回收正在被次用户使用的信道时，次用户必须在可用信道间无缝切换。同时，当新地域里的信道不可用(即被主用户或次用户占用)时，次用户从一个地域移动到另一个地域。因此，次用户必须能够做出智能信道切换的决策。

频谱管理进程的任何一部分都要与其他部分合作。因此，跨层设计对于有效实现认知无线网络至关重要。例如，如果频谱决策工具通知主用户已返回，频谱迁移便开始实施切

换；发布主用户返回的信息必须依靠频谱感知进程中的感知结果。这表明切换进程直接取决于物理层检测进程。

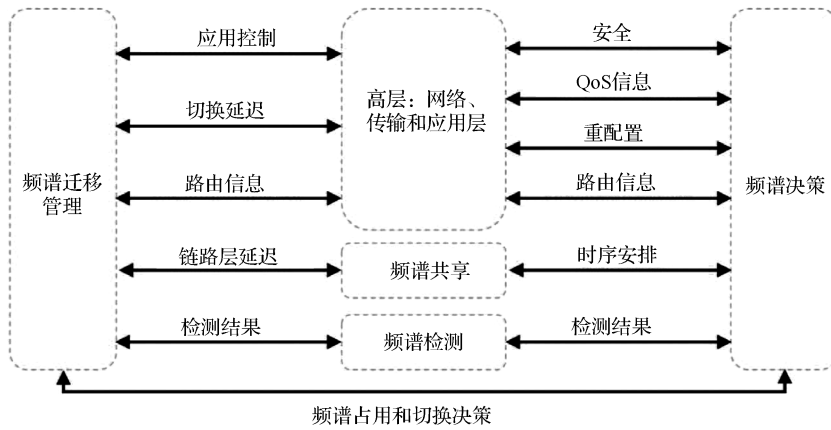


图 1.3 频谱管理框架

1.4 认知无线电模式

认知无线电模式可分为三大类：交织、重叠和覆盖^[13,14]。本节重点分析这些模式之间的异同。

1.4.1 交织模式

交织是最简单的认知无线电模式，是促成认知无线电概念形成的原动力。在交织模式中，次用户随机接入未被占用的信道，即只侧重于探测频谱空穴（即未被占用的信道）。换句话说，认知无线电用户不可能与主用户共存，见图 1.4。交织模式也被称为随机频谱接入。

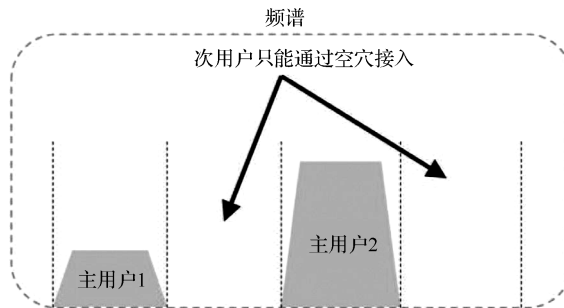


图 1.4 交织模式

1.4.2 重叠(底层)模式

与交织模式不同，在重叠模式中，只要次用户发送信号的功率低于干扰阈值或干扰程度，次用户就可以与主用户共存^[15]。例如，次用户可以将信号扩展到很宽的频段上，并以低

于主用户噪声上限的功率发送,见图 1.5。这种模式的优点在于不需要对频谱进行检测。与交织模式相比,在主用户总是存在的一些系统中,重叠模式对次用户更加有利。但是,重叠模式中次用户的发送功率受到设定阈值的限制,因此,它只能用于次用户间的短距离通信。

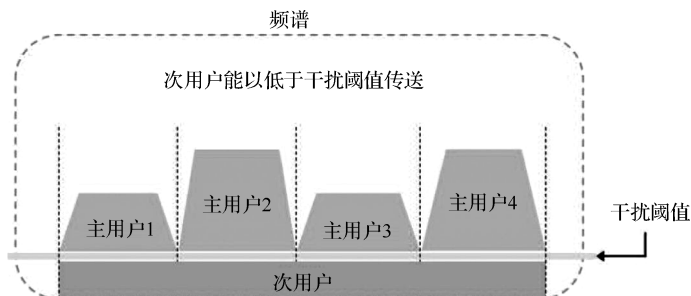


图 1.5 重叠模式中, CR 只能以低于干扰阈值传送

1.4.3 覆盖模式

覆盖模式与重叠模式相似,在覆盖模式中,认知无线电用户可与主用户共存。然而,次用户必须拥有完整的主用户信号信息,如主用户所发送的消息和编码。在这种情况下,次用户能够与主用户共存。更重要的是,次用户能够以任意的功率(前提是不会对主用户造成破坏性的干扰)发送信息。因为假定认知无线电用户知道主用户使用的消息和编码,认知无线电用户可以利用这些信息,利用“脏纸”(dirty paper)编码之类的技术消除由主用户引起的干扰。不仅如此,次用户还能辅助转发部分或全部主用户消息到其最终目的地,从而帮助消除主用户的干扰^[14]。覆盖模式的主要缺点是次用户在这种模式下必须获取主用户信号的完整信息。而这涉及数量巨大的主用户网络和认知无线网络之间有效的协调,因此,这样的假设条件可能无法实现。

1.4.4 小结

每个模式都有其优点和缺点。表 1.1 总结了这三个模式之间的主要差异。

表 1.1 认知无线电不同模式间的比较

模式	交织	重叠	覆盖
次用户能否与主用户共存	不能	能	能
功率自适应	不需要	需要	不需要
所需知识	频谱(出现空穴的)机会	干扰程度	完整的主用户消息和码书的知识

直观地看,这些模式结合起来可以进一步完善认知无线网络,如提高网络的总吞吐量。例如,交织和重叠模式的混合方案可以使次用户在未被占用的频段以大功率发送,在主用户占用的频段以小功率发送。该方案通常称为基于感知的频谱共享^[16]。图 1.6 解释了这一概念,其中有两个次用户:次用户 1 使用混合方案,次用户 2 使用重叠方案。在 T_1 时刻,由于主用户 1 和主用户 2 的存在,两个认知无线电用户都以低于干扰阈值的功率发送。如果主用户退出信道,如图 1.6 中的 T_2 时刻,那么与次用户 2 不同,次用户 1 就像正在使用交织模式一样,自适应调整其发送功率(即次用户 1 会提高其发送功率)。

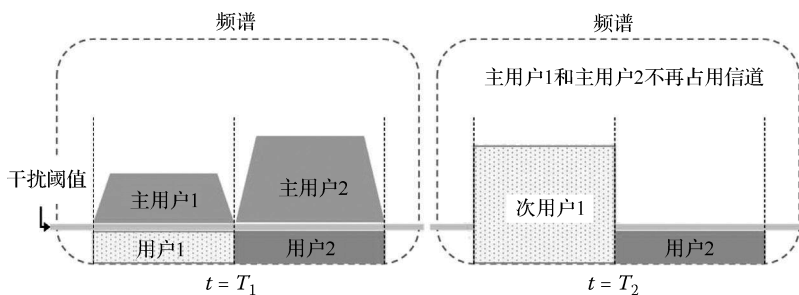


图 1.6 混合方案实例

1.5 本书的结构

本书旨在介绍频谱周期内的主要难题和技术，着重介绍了解决这些难题的合作方法。读者需要具备无线通信系统的基本知识，最好能够按照章节顺序阅读本书。但是由于章节之间的数学推导或协议设计关联度不大，所以读者也可以不按章节顺序进行阅读。然而，各章节之间存在概念上的依存关系。

第2章将探讨单波段和多波段情况下的主要频谱感知技术，并且比较不同方法之间的异同。

第3章将介绍协同频谱感知的基本原理，还将介绍一些用于频谱感知和获取的联合分级与协同分集技术。

第4章将介绍当把干扰视为一个设计参数时，在频谱交织和重叠模式情况下所使用的协同频谱获取技术。

第5章将讨论在频谱感知和获取技术的设计与操作阶段需要进行的不同权衡，以及对性能的影响，例如延迟、吞吐量或功效。

第6章将研究频谱迁移问题，介绍并深入比较不同的切换技术和策略。

第7章将介绍认知无线网络下的介质访问控制(MAC)协议。特别提出了无通用控制信道时使用的合作与非合作介质访问控制层协议。它解决了设计中面临的难题(解决了认知无线网络MAC协议设计问题)，并且满足了其特殊要求。

第8章旨在探讨认知无线电Ad Hoc网络(CRAHN)，分析认知无线电Ad Hoc网络和普通认知无线电之间的主要差异。本章将阐述频谱共享问题和认知无线电Ad Hoc网络模型中度量规则的基本要素。本章特别关注频谱共享中的局部控制策略和公平协议。

第9章从移动性和主用户专属区域等方面探讨认知无线电Ad Hoc网络中的MAC协议；深入比较不同协议间的异同并举例说明。

第10章涵盖网络层，包括路由协议分类和由此带来的难题。本章重点研究分布式和集中式网络方案、移动性问题和高动态网络。

第11章提出基于博弈论的认知无线网络经济框架，在将物理层参数和干扰等级视为经济框架组成部分的前提下，阐述了不同的策略和市场模型，其中包括固定(频谱)价格市场、单向拍卖和双向拍卖(频谱资源)。

第12章将针对认知无线网络中的安全问题进行综述；讨论用以确定用户在网络中好

坏的信任度标准；将研究线路中断、干扰和模拟主用户攻击等攻击类型。此外，本章还将深入讨论这些攻击对于网络的影响以及降低这些风险的措施。

参考文献

1. C. Fortuna and M. Mohorcic, Trends in the development of communication networks: Cognitive networks, *Computer Networks*, 53 (9), 1354–1376, June 2009.
2. D. Grace, *Introduction to Cognitive Communications*, John Wiley & Sons, Ltd., 2012.
3. Q. Zhao and B. Sadler, A survey of dynamic spectrum access: Signal processing, networking, and regulatory policy, *IEEE Signal Processing Magazine*, 24 (3), 79–89, May 2007.
4. S. Haykin, Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23 (2), 201–220, February 2005.
5. W.-Y. Lee, M. C. Vuran, S. Mohanty, and I. F. Akyildiz, A survey on spectrum management in cognitive radio networks, *IEEE Communications Magazine*, 46 (4), 40–48, April 2008.
6. B. Razavi, Cognitive radio design challenges and techniques, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 45 (8), 1542–1553, August 2010.
7. G. Hattab and M. Ibnkahla, Multiband spectrum access: Great promises for future cognitive radio networks, *Proceedings of the IEEE*, 102 (3), 282–306, March 2014.
8. E. Axell, G. Lues, E. Larsson, and H. V. Poor, Spectrum sensing for cognitive radio: State-of-the-art and recent advances, *IEEE Signal Processing Magazine*, 29 (3), 101–116, May 2012.
9. B.-H. Juang, J. Ma, and G. Y. Li, Signal processing in cognitive radio, *Proceedings of the IEEE*, 97 (5), 805–823, May 2009.
10. T. Yucek and H. Arslan, A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications, *Communications Surveys and Tutorials*, 11 (1), 116–130, 2009.
11. A. De Domenico, E. C. Strinati, and M.-G. D. Benedetto, A survey on MAC strategies for cognitive radio networks, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 14 (1), 21–44, 2012.
12. C. Cormio and K. R. Chowdhury, A survey on MAC protocols for cognitive radio networks, *Ad Hoc Networks*, 7 (7), 1315–1329, September 2009.
13. J. Peha, Approaches to spectrum sharing, *IEEE Communications Magazine*, 43 (2), 10–12, February 2005.
14. A. Goldsmith, S. Jafar, I. Maric, and S. Srinivasa, Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: An information theoretic perspective, *Proceedings of the IEEE*, 97 (5), 894–914, May 2009.
15. T. Clancy, Achievable capacity under the interference temperature model, in *Proceedings of the IEEE 26th International Conference on Computer Communications (INFOCOM'07)*, Anchorage, AK, May 2007.
16. H. Garg, L. Zang, X. Kang, and Y.-C. Liang, Sensing-based spectrum sharing in cognitive radio networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58 (8), 4649–4654, October 2009.