

认知无线自组织网络中的 可用带宽估计理论和应用

赵海涛 王 杉 宋 安 著



科学出版社

认知无线自组织网络中的可用 带宽估计理论和应用

赵海涛 王 杉 宋 安 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书重点介绍了认知无线自组织网络可用带宽估计中的基本问题,从理论和技术两方面介绍了在认知无线自组织网络中进行准确可用带宽估计的方法,并结合无线网络中支持服务质量的接纳控制和协同通信等热点问题,介绍了可用带宽估计技术的应用。本书的主要内容包括认知无线自组织网络的基本概念和关键技术、可用带宽估计的基础理论和技术、基于感知的可用带宽估计方法、基于模型的可用带宽预测方法、可用带宽的优化分配方法和可用带宽估计技术在接纳控制与协同通信中的应用。

本书可作为高等院校电子信息、计算机等专业高年级本科生和研究生的教材,也可供通信网络领域的技术人员和科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

认知无线自组织网络中的可用带宽估计理论和应用/赵海涛,王杉,宋安著. —北京:科学出版社,2015

ISBN 978-7-03-043888-1

I. ①认… II. ①赵… ②王… ③宋… III. ①无线电通信-自组织系统-通信网-网络带宽-估计 ②无线电通信-自组织系统-通信网-网络带宽-预测技术 IV. ①TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 055185 号

责任编辑:王 哲 邢宝钦 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:迷底书装

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>

文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 4 月第 一 版 开本:720×1 000 1/16

2015 年 4 月第一次印刷 印张:10

字数:194 000

定价:55.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

认知无线自组织网络技术是指通过对无线网络环境的认知,进行自适应的规划、决策和调度,自组织地完成组网,进而可自适应于动态无线通信环境的一种无线组网技术。该技术不仅可以自适应于无线网络资源的动态变化,还可以提高网络资源的利用效率和无线电通信的兼容性,更能为复杂电磁环境下通信资源和通信手段的融合与协作等提供更大的灵活性。

对网络资源的认知是认知无线自组织网络工作的重要基础,而在网络资源认知方面,无论物理层的频谱资源、链路层的信道资源,还是网络层的路由资源,最终都将转化为网络中端到端的带宽资源。换言之,可用带宽信息综合体现物理层频谱空洞感知结果、链路层动态接入策略和网络层的路由选择,既是对终端用户非常直观的重要端到端信息,又是进行网络全局优化的重要依据。因此,获取端到端的可用带宽信息对认知无线自组织网络有重要的意义。

由于认知无线自组织网络的动态特性,要准确估计其端到端可用带宽并不是件容易的工作,本书总结了作者最近几年在这方面的的工作,尽量从理论和技术两方面进行较清晰的描述,希望能够帮助读者理清这方面的已有工作和后续发展思路。第1章主要介绍认知无线自组织网络的基本概念、特色和研究现状。第2章在总结其关键技术的基础上,分析获取可用带宽信息对于认知无线自组织网络的重要意义。第3章主要阐述可用带宽估计的基础理论和技术,包括对现有常用方法的总结和对后续章节中用到的基础知识的介绍。第4~6章主要介绍基于感知的可用带宽估计方法。其中,第4章以单跳链路的可用带宽估计为重点,详细分析可用带宽估计中需要考虑的各个因素;第5章对其进行扩展,分析多跳路径的可用带宽估计中的问题和解决方法;第6章设计一种卡尔曼滤波器结合变化检测器的方法,应对实时可用带宽估计中存在的挑战。第7~9章主要介绍基于模型的可用带宽预测方法。其中,第7章主要阐述基于模型进行可用带宽预测的基本思想,完整介绍网络的建模过程和利用该模型进行可用带宽估计的方法;第8~9章的工作是在第7章的基础上进行两个扩展:一是在原有网络模型的基础上加入排队模型,这样可以应用于有排队情况的更广泛的网络场景;二是对可用带宽的定义进行收紧,不是仅考虑业务的端到端吞吐量,而是考虑更全面的服务质量(Quality of Service, QoS)准则。同样地,首先在第8章考虑单跳网络的情况,然后在第9章考虑多跳网络场景。第10章的重点是从优化分配感知时间和数据传输时间的角度,分析认知无线自组织网络中的可用带宽优化问题。第11章主要介绍可用带宽信息在认知无线自组织网络中的两个应用案例。

本书的研究内容获得了国家自然科学基金(No.61002032、No.61471376)的资助,在此表示感谢。由于认知无线自组织网络技术正在快速发展,加上作者水平有限,本书难免存在一些不足之处,恳请各位读者批评指正。

作 者

2015年1月于长沙

目 录

前言

第 1 章	绪论	1
1.1	认知无线自组织网络的基本概念	1
1.1.1	认知无线自组织网络与认知无线网络	2
1.1.2	认知无线自组织网络与传统自组织网络	3
1.2	认知无线自组织网络的研究及其应用	4
1.2.1	国内外研究概况	4
1.2.2	相关标准化工作	5
第 2 章	认知无线自组织网络关键技术分析	8
2.1	网络信息感知技术	8
2.1.1	频谱感知技术	8
2.1.2	可用带宽估计技术	10
2.2	动态接入控制技术	12
2.2.1	信道协商机制	12
2.2.2	信道选择策略	14
2.3	智能决策与网络重构技术	15
2.4	可用带宽信息对认知无线自组织网络的意义	16
第 3 章	可用带宽估计的相关模型和主要方法	18
3.1	基本模型和概念	18
3.1.1	认知无线网络频谱共享方式	18
3.1.2	认知无线网络干扰模型	19
3.1.3	无线网络中的排队模型	22
3.2	可用带宽估计的主要方法和问题	24
3.2.1	基于探测的方法	24
3.2.2	基于感知的方法	26
3.2.3	基于模型的方法	29
第 4 章	共享信道情况下单跳链路的可用带宽估计	32
4.1	共享单信道情况下单跳链路模型	32
4.2	单跳链路可用带宽估计中的问题	33

4.3	对干扰的考虑: 单节点信道空闲比率的计算	35
4.4	多用户竞争与退避过程	36
4.5	隐藏节点引起的碰撞概率的数学表达	37
4.5.1	隐藏节点的概念及其分类	38
4.5.2	碰撞概率计算	39
4.6	同步问题的考虑	42
4.7	仿真评估	43
第 5 章	共享信道情况下多跳路径的可用带宽估计	48
5.1	多跳路径中的流内竞争问题描述及其经典分析模型	48
5.2	多跳路径中的流内竞争分析	50
5.2.1	竞争图的一般构建过程	50
5.2.2	多跳链路的竞争图与分析	52
5.3	基于最优化方法的端到端可用带宽估计	53
5.3.1	最优化问题的数学建模	54
5.3.2	最优化问题的求解	55
5.3.3	估计多跳路径端到端可用带宽的实例	56
5.4	评估实验	57
5.4.1	多跳路径可用带宽估计方法的准确性	58
5.4.2	多跳路径端到端带宽容量	59
5.4.3	负载控制效果与瓶颈链路位置的关系	59
5.4.4	多速率的情况	61
第 6 章	实时可用带宽估计方法	63
6.1	问题描述	63
6.2	卡尔曼滤波器的数学模型	65
6.3	参数设置	66
6.4	对卡尔曼滤波器的测试	67
6.5	基于卡尔曼滤波器的实时可用带宽估计	68
第 7 章	基于模型的可用带宽预测的基本方法	71
7.1	模型的建立	71
7.1.1	模型整体框架	71
7.1.2	S-R 链路模型	72
7.1.3	干扰模型	76
7.1.4	参数映射模型	76
7.1.5	参数初始化	77
7.2	基于模型的可用带宽预测算法	78

7.2.1	预测带宽可行性的算法	79
7.2.2	端到端可用带宽预测	80
7.3	基于模型的可用带宽预测算法的评估	81
7.3.1	可用带宽预测的准确性评估	81
7.3.2	更多评估的统计结果	81
7.3.3	模型的合理性及其与已有研究成果的一致性	83
7.4	基于模型算法的进一步讨论	85
第 8 章	单跳网络中保障 QoS 的可用带宽预测	87
8.1	服务时间与无限队长排队模型	87
8.1.1	服务时间的表达式	87
8.1.2	服务时间的均值与方差	89
8.1.3	M/G/1 排队模型下的 QoS 参数	90
8.2	有限队长排队模型	91
8.2.1	基于信号传递函数的服务时间模型	91
8.2.2	M/G/1/K 排队模型	93
8.2.3	M/G/1/K 排队模型下的 QoS 参数	94
8.3	支持全局 QoS 保障的可用带宽预测方法	95
8.4	分析模型与可用带宽估计算法的仿真评估	98
8.4.1	带宽需求可行性判定算法的合理性	98
8.4.2	有限队长分析模型下可用带宽预测的准确性	100
第 9 章	多跳网络中保障 QoS 的可用带宽预测	102
9.1	排队网络的扩散近似法	102
9.2	排队网络参数映射与 QoS 表达	103
9.2.1	排队网络的参数映射	103
9.2.2	多跳路径中业务流的 QoS 参数	106
9.3	基于 QoS 保障原则的多跳路径可用带宽预测	107
9.3.1	可用带宽预测方法	107
9.3.2	仿真验证	108
9.4	多跳路径稳定容量分析	111
9.4.1	简化的排队网络模型与路径容量计算方法	112
9.4.2	仿真验证与分析	113
第 10 章	感知时间与发送时间比例对可用带宽的影响和优化方法	116
10.1	系统模型	116
10.2	最优发送时间分析	117
10.3	考虑最优发送时间的认知 MAC 协议设计	119

10.4	认知 MAC 协议性能分析	120
10.4.1	空闲时隙分类	120
10.4.2	利用马尔可夫模型进行性能分析	121
10.5	仿真评估	123
10.5.1	感知时间的影响	123
10.5.2	发送时间的影响	124
10.5.3	认知用户网络密度的影响	125
第 11 章	可用带宽信息应用案例	127
11.1	基于可用带宽的多跳接纳控制方法	127
11.1.1	算法描述	127
11.1.2	仿真评估	129
11.2	基于可用带宽的分布式协同中继节点选择	132
11.2.1	协同中继节点选择问题介绍与分析	132
11.2.2	基于干扰感知的分布式中继节点选择算法	134
11.2.3	实验与性能评估	139
参考文献		141

第1章 绪 论

随着无线通信网络的广泛应用，我们所面临的电磁环境也越来越复杂，网络 and 用户的类型、数量日趋庞大，而且网络业务的服务类型和需求也日趋多样化，单一无线通信技术已经不能满足人们不断增长的、多样化的通信需求。与此同时，以频谱为代表的无线资源越来越成为一种稀缺的资源，而传统的固定网络资源分配模式使得频谱的利用率又十分低下。由此面临着两个重要的挑战：一是如何在网络环境日趋复杂的情况下，使网络自主地进行自适应组网和控制，在满足用户动态业务需求的同时降低维护成本；二是如何解决无线网络资源已几乎分配殆尽，而网络资源的实际利用率又极低的矛盾。在此背景下，认知无线自组织网络技术被提出并得到不断发展，为应对上述挑战提供了一个光明的解决方向。

1.1 认知无线自组织网络的基本概念

认知无线自组织网络（Cognitive Radio Ad Hoc Network, CRAHN）^[1]技术是指通过对无线网络环境的认知，进行自适应的规划、决策和调度，自组织地完成组网，进而可自适应于动态无线通信环境的一种无线组网技术。认知无线自组织网络技术不仅可以自适应于无线网络资源的动态变化，还可以提高网络资源的利用效率和无线电通信的兼容性，更能为复杂电磁环境下通信资源和通信手段的融合与协作等提供更大的灵活性。

认知无线自组织网络技术并不是一种全新的网络体系，一般来讲，它可认为是认知无线网络（cognitive wireless network）技术和自组织网络技术自然结合、发展而产生的网络形态，如图 1.1 所示。其中，认知无线网络从认知无线电（Cognitive Radio, CR）扩展而来，但不限于由认知无线电设备组成的网络。它是一种具有高度智能化的无线网络，可以感知网络的环境信息，并据此进行相应的规划、决策和重构，最终实现网络的端到端性能。认知无线网络与认知无线电既有紧密的联系，又有区别，如表 1.1 所示。自组织网络（self-organizing network）是一种以自我管理、自优化和自修复为主要特点的网络。近年来在无线异构网络的融合与协作中又焕发了新的生命力。

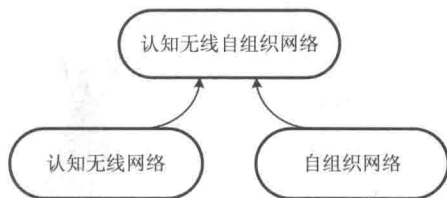


图 1.1 认知无线自组织网络以认知无线网络技术和自组织网络技术为支撑

表 1.1 认知无线网络与认知无线电的比较

		认知无线电	认知无线网络
不同点	认知对象	无线电设备	无线网络（必须同时考虑无线电设备间的合作与竞争）
	优化目标	点到点	端到端
	优化方法	无线电设备自主优化	分布式、全局优化
	复杂性	根据周围环境，针对单个设备进行参数优化，复杂性较低	增加的网络节点数目、网络状态、交互信息量和交互范围，以及可能冲突的多个目标，导致复杂性较高
相同点	认知过程	都包括对周围环境的感知、推理、决策和学习过程	
	参数可调	一般基于软件无线电技术实现	
	跨层考虑	物理层、通信协议层需要进行交叉考虑	

认知无线网络与自组织网络的结合是一个自然的过程，可以发挥它们各自的优势。认知无线网络为自组织网络的自管理、自优化和自修复过程提供了对网络环境的认知信息和操作依据，而自组织网络为认知无线网络的决策执行提供了支撑，同时也提供了更大的灵活性。由两者结合发展起来的认知无线自组织网络技术很好地继承了两者的优势，而又与以往的网络技术有较大的区别，下面分别介绍其与认知无线网络和自组织网络的异同。

1.1.1 认知无线自组织网络与认知无线网络

基于认知的无线组网方式可以大体分为两类：基于基础架构的组网方式和基于自组织的组网方式^[2]，传统的认知无线网络更注重的是前者，而认知无线自组织网络主要针对后者。

基于基础架构的认知无线网络由认知无线网络接入点和认知无线网络节点组成，如图 1.2 所示。其中接入点可以是中心网络的基站，也可以是无线局域网（Wireless Local Area Network, WLAN）的接入点，它起到网络控制中心的作用。认知无线网络节点

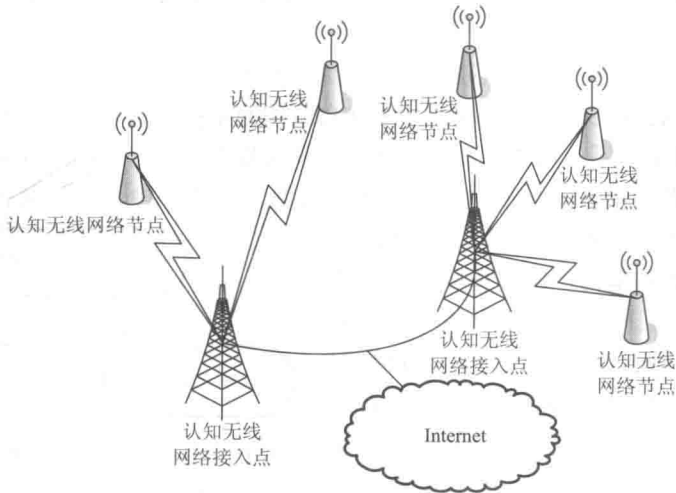


图 1.2 基于基础架构的认知无线网络

都必须通过接入点来接入网络,从而可进一步与其他网络节点进行通信。在这个过程中,每个认知节点的感知结果可以一起送到基站或接入点,以便其做出如何避免干扰主用户网络的决定。根据这个决定,每个认知用户就会重新配置各自的通信参数,从而在不干扰主用户的情况下进行通信。

基于自组织方式的认知无线网络中,没有任何基础架构的支撑,所有节点地位平等,两个认知节点之间可以在授权和未授权的频段使用自组织连接方式进行通信,网络节点既能与相邻的节点直接相互通信,又能协助其他网络节点完成多跳通信,如图 1.3 所示。在此网络架构下,每个认知节点都要有所有的认知功能,并且要根据局部观察信息做出决策和调整。因为认知用户通过局部的观察不能够预测其决策在整个网络中的影响,所以为了达到更佳的网络性能,在不同设备之间往往需要相互协作,通过交换各自观察到的信息来扩宽单个节点对网络全局信息的了解。

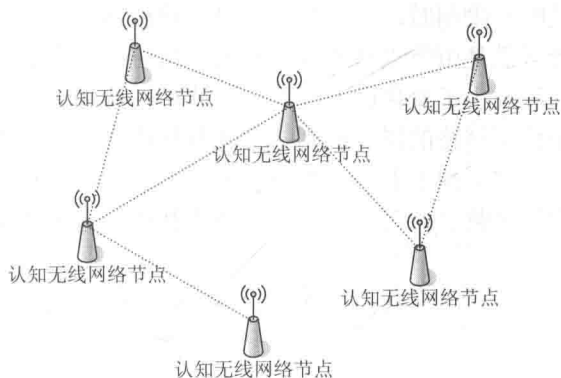


图 1.3 基于自组织方式的认知无线网络
(认知无线自组织网络)

1.1.2 认知无线自组织网络与传统自组织网络

认知无线自组织网络与传统自组织网络的区别主要在于是否存在优先级较高的授权用户、对无线频谱的使用,以及对无线环境认知的智能化程度上。具体而言,包括以下几个方面。

(1) 在认知无线自组织网络中,可用的频段可以分布在很宽的频率范围内,在时间和空间上可能会不断地变化。因此,每个认知用户(非授权用户)根据主用户(授权用户,优先级较高)活动的情况会有不同的可用频谱。传统自组织网络一般工作在事先确定的一条或几条不随时间改变的信道上,网络节点对这些信道进行竞争,没有考虑优先保护主用户的数据发送。

(2) 在自组织的组网方式下,不设置控制中心,因此必须依靠局部合作来收集拓扑结构的信息。在传统自组织网络中,通过信道中周期的信标信息可以较容易地完成收集拓扑结构信息的任务。然而,在认知无线自组织网络中,由于授权频谱很可能存在于大范围的频率上,所以在每个可能的信道上发送信标信息是不可行的。因此,认知无线自组织网络要获得充分的拓扑结构信息更加困难。

(3) 在认知无线自组织网络中,端到端的路径是多跳方式的,各跳通信可以根据可用的频谱范围使用不同的信道。因此,它在建立这些路径时需要路由和频谱分配之间的合作,而且由主用户到达的不确定性引起的路径上频谱转变是很频繁的。与传统

自组织网络相比,在认知无线自组织网络中保持端到端的服务质量(Quality of Service, QoS)不仅要考虑传输的负载,还要考虑有多少不同的信道和在此路径上可能使用的频段、主用户导致可用频段发生改变的可能性等诸多因素。

(4) 在分布式无线网络中,多跳方式形成的路径可能会由于节点的移动出现链路中断的情况。在传统自组织网络中,当路径上的节点不回复信息并且链路层的重传超过时间限制时,这种情况就可以被检测。然而,在认知无线自组织网络中,链路中断既可能是由节点移动性引起的,又可能是由于受到主用户的影响而使某个节点的通信频段发生了变化而引起的。因此,在认知无线自组织网络中,正确判断节点移动性的条件和链路的恢复机制都不能直接沿用传统自组织网络的方法。

(5) 由上面的分析可以看出,认知无线自组织网络更复杂,因此,为了完成分布式、多跳、自组织的组网,要求其进行自主决策的过程更加智能化。

1.2 认知无线自组织网络的研究及其应用

1.2.1 国内外研究概况

认知无线自组织网络的应用相当广泛,简单地可以划分为以下几类:频谱租赁、网络融合、军事应用、紧急救灾等。在第五代无线通信(5G)系统中,认知无线自组织网络技术也将在异构网络融合、用户 QoS 提升等方面发挥关键作用。

正是认识到认知无线自组织网络广泛的应用前景和其带来的好处,世界范围内都已深入开展了一系列相关的研究。美国国家自然科学基金在全球网络互联创新环境(Global Environment for Networking Innovation, GENI)项目下,资助了基于认知无线电的动态频谱共享项目的研究,主要的研究内容包括:动态频谱测量、频谱共享方法、物理层自适应的无线网络协议和认知无线电新技术的验证等。加州大学伯克利分校、弗吉尼亚理工大学、佐治亚理工学院等大学和研究所,以及 Blossom 公司和无线创新论坛(前身为软件无线电论坛)等研究组织纷纷展开认知无线自组织网络相关技术的研究。另外,美国国防部高级研究计划署(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)还资助了下一代(Next Generation, XG)和再下一代无线网络(Wireless Network after Next, WNaN)项目。XG 项目的目标是使得美国军用通信设备可以检测环境变化,根据所处环境的频谱管理政策选择频谱,该项目重点针对自组织网络,采用完全自由的择机频谱接入。WNaN 项目的目标是开发更先进的网络波形和价格更低廉的无线通信终端,从而搭建可扩展、自适应的认知无线自组织网络。

欧盟的第六框架计划(Sixth Framework Programme, FP6)、第七框架计划(Seventh Framework Programme, FP7)信息社会技术项目,开展了对认知无线电和认知网络技术的研究。其中,在面向下一代网络研究的端到端可重配置(End-to-End Reconfigurability, E2R)项目中,开展了基于协作的认知无线电、认知网络和认知无线自组织网络技术的研

究。仅 2008 年启动的项目中就有 5 个有关认知无线电和认知网络技术的项目,投入经费近 5000 万欧元。其中,具有代表性的是大型跨国项目端到端的效率(End-to-End Efficiency, E3),其前身为欧盟 FP6 项目 E2R,经费达 1500 万欧元。E3 的目标是保证应用和服务在异构网络环境下的无缝接入,将从网络的角度优化频谱的使用,涉及认知无线电、自组织网络和认知网络的技术、商业、规划和标准化等各个方面,研究成果将直接输出到国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)、第三代伙伴项目(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)、美国电气电子工程师学会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)等标准化组织。

我国从“十五”末开始就在 863 计划启动了有关认知无线电和认知网络技术的前期研究工作。在“十一五”和“十二五”期间,国家分别从基础理论、关键技术和实验验证的角度,进一步加强了对认知无线电和认知网络领域的研究,其中比较重要的研究项目和课题包括:国家自然科学基金“认知无线电”重点项目群(2009—2011 年)支持了 3 个重点项目,重点解决频谱认知、动态频谱管理和抗干扰等问题。国家 973 计划项目“认知无线网络基础理论与关键技术研究”(2009—2014 年)和“智能协同宽带无线网络理论基础研究”(2013—2018 年)等。

1.2.2 相关标准化工作

目前,专门针对认知无线自组织网络的标准协议还未成形,但针对认知无线电的一系列标准已先后开始制订。涉及认知无线电相关标准制订的组织和行业联盟主要有 ITU、无线创新论坛和 IEEE 等。ITU 关于认知无线电的研究工作原来隶属于 ITU-R8 A 工作组中的软件无线电研究课题,因为软件无线电不足以涵盖认知无线电的所有范畴,同时也充分认识到认知无线电技术在未来通信发展中的重要意义,ITU-R 于 2006 年 3 月开始将认知无线电单独作为一个研究课题进行研究。另外,无线创新论坛于 2004 年 10 月成立了认知无线电工作组与认知无线电特殊兴趣组,专门开展有关认知无线电技术的研究,标准化认知无线电定义和确认可用于认知无线电的技术。目前美国 IEEE 对于认知无线电技术的标准化推进工作是最积极的,已经或正在制订的与认知无线电相关的标准主要包括 IEEE 802.22^[3]、IEEE 802.16h^[4]、IEEE 1900^[5]、IEEE 802.11h^[6]和 IEEE 802.11af^[7]等。

1) IEEE 802.22 标准

2004 年 11 月第一个基于认知无线电的无线标准 IEEE 802.22 工作组成立,目的在于研究运营在广播电视频段的认知无线广域接入网络(Wireless Regional Area Network, WRAN)技术,以便在无干扰的基础上利用未被使用的广播电视频段。IEEE 802.22 无线区域网络工作于 54~862MHz VHF/UHF(扩展频率范围为 47~910MHz)频段中的 TV 信道,它可自动检测空闲的频段资源并加以使用,因此可与工作于此频段的电视、无线麦克风等设备共存。

IEEE 802.22 系统采用的是固定的一点对多点无线空中接口,即基站(Base Station, BS)

管理着整个小区和相关的用户终端。基站控制小区内媒体接入和下行传输给相应的用户终端。用户终端必须在收到基站的授权后才能传输。得益于电视频带的良好传播特性,基站的覆盖范围半径最大可达 100km。图 1.4 所示为基于 802.22 协议的 WRAN 部署示意图。802.22 系统包括一个基站和多个用户终端设备(包括住宅用户、中小型工作场所和企业用户等)。为了实现共存,802.22 包含相应的物理层和 MAC(Media Access Control)层控制机制,允许基站基于对授权用户的频谱感知来动态改变网络的功率或者频率,以避免干扰。为了解决重叠覆盖造成的问题,实现更好的共享频谱,系统还包含各基站之间的协调机制。

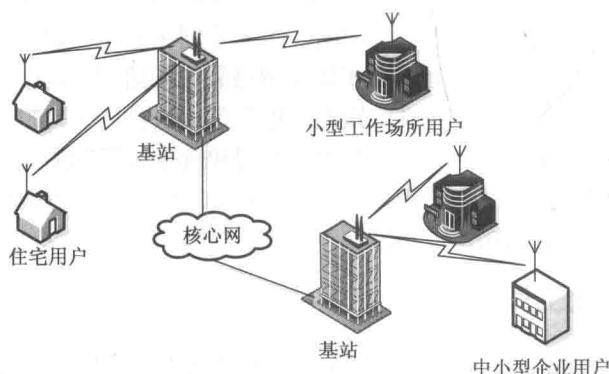


图 1.4 基于 802.22 协议的 WRAN 部署示意图

目前,基于 802.22 协议的 WRAN 主要应用在农村和偏远地区,以及人口密度低、服务困难的地方,实现无线宽带接入。事实上,为农村和偏远地区提供宽带接入需要网络具有大的覆盖面,也是该技术选择电视频段的主要原因,因为该频段有特别适合偏远地区用户使用的传输特性。另外,如果大多数家庭和商业用户都依赖光纤和卫星实现电视服务,那么许多地区大量的电视频道都没有使用,造成了资源的浪费。至关重要的一点是,用于电视频段的 802.22 设备不需要牌照,这将进一步降低成本,从而提供一个可负担得起的服务。当然,这并不是说 802.22 的应用和市场仅限于农村和偏远地区。实际上还有许多其他可利用 WRAN 的场景,包括个人家庭住户、多聚居单元、SOHO(Small Office Home Office)、多用途写字楼,以及一些工作场所和校园等。

2) IEEE 1900 系列标准

为了开发下一代无线电和先进频谱管理技术,IEEE 1900 于 2005 年由 IEEE 通信协会和 IEEE 电磁兼容性协会联合设立,其重点工作是开发和处理与认知无线电相关的新技术、新方法及其标准化。2007 年 3 月,IEEE 1900 重组为第 41 标准协调委员会(Standards Coordinating Committee, SCC),2010 年该组织进入 IEEE CSSB(ComSoc Standards Board),随即重新命名为 IEEE DySPAN-SC(DySPAN Standards Committee)。

DySPAN-SC 标准化工作涉及的主要内容包括:以提高频谱利用效率为目的的动

态频谱接入无线电和网络系统、包含无线资源分配和干扰管理在内的动态频谱接入技术,以及网络信息在不同无线技术间的共享和协作管理。其中,分布式无线资源的最优化使用是这些工作中的一个重点。无线资源选择过程涉及网络和多模终端之间的分布式决策,因而也与认知无线自组织网络技术紧密相关。

特别需要强调的是 IEEE 1900.4 工作组的工作。该工作组旨在规范认知无线网络,重点是以优化无线资源在异构无线接入网络中的使用为目的,建立实现分布式决策的网络架构和功能模型。其中既包括基于基础设施的网络(如 4G 蜂窝网和无线接入网),又包括无基础设施的自组织网络。该工作组目前定义了标准中应具备的三个典型功能:①动态频谱分配,允许频谱动态地在不同系统中重新分配;②动态频谱接入,使频谱的使用更加具有机动性;③分布式无线资源使用最优化,使在网络和多模终端之间的分布式决策在无线电资源选择过程中切实可行。基于这些目标功能,展开了对于系统需求、系统架构,以及相应的信息模型、函数和接口技术的研究与讨论。

3) IEEE 802.11af 标准

IEEE 802.11af 通常也被称为 White-Fi 或 Super Wi-Fi,它的核心为使用电视空白频谱的 Wi-Fi 技术。与 802.22 相比,由于系统功耗更低,它的覆盖范围更小,一般是用于 WLAN,但由于其频段一般工作在 54~790MHz 的 VHF 和 UHF 频段(带宽为 6~8MHz),比采用 2.4GHz 和 5GHz 的 802.11 a/b/g/n/ac 等标准的覆盖又有显著提升。

为了能够运行,802.11af 首先要确保该系统与现有的电视传输并不存在任何干扰,其次还要采取更加灵活的频谱分配方法和功率控制,使得相邻的多个 White-Fi 系统可以无干扰地同时工作。要做到上述两点必然要依靠认知无线网络技术。该标准于 2014 年 2 月被正式批准,可以预见,在不久的将来,White-Fi 系统将被很好地发展和商用。

第2章 认知无线自组织网络关键技术分析

与一般认知无线网络相同,认知无线自组织网络的功能模块也包括认知、决策和重构,其中认知模块的主要工作是完成对网络信息的感知,而决策和重构是基于认知的信息进行参数优化和调整过程。与一般认知无线网络的不同之处在于,认知无线自组织网络更强调整个过程的分布式实现,其中各个网络节点间要进行信息交互和分享,而这部分工作主要依靠网络协议,特别是以动态接入控制为核心的MAC协议来实现。下面分别从网络信息感知、动态接入控制、智能决策与网络重构三个方面详细介绍其关键技术。

2.1 网络信息感知技术

频谱资源(频谱空洞)是无线网络物理层最基础的可用资源,而从网络层的角度来看,该资源可映射为端到端的带宽资源。通过感知而获得这些资源信息是保证无线网络业务QoS的一个重要前提,也是认知无线网络的工作基础,其感知结果的准确性将直接决定频谱利用率和业务流所能达到的性能。

2.1.1 频谱感知技术

按照感知的对象不同,频谱感知可分为基于发射源的感知和基于干扰的感知。根据感知方式的不同,目前对频谱检测技术的研究主要包含两方面:一是单点频谱检测技术,根据单个认知无线电节点接收的信号,检测其所处无线环境的频率占用状态;二是多点协作频谱检测技术,即把多个节点的频谱检测结果进行合并,以提高检测正确率,并降低对单节点的性能要求。

1) 基于发射源的感知

针对发射源的不同特征进行感知,该方法又可细分为以下几类。

(1) 能量检测^[8]:在一定频段内检测能量的积累,如果积累后的能量高于设定的门限,则说明有信号存在,否则只有噪声。能量检测的优点是无须任何检测信号的先验知识,属于非相关检测。缺点是检测速度慢,并且对门限值的设定也非常敏感。

(2) 匹配滤波检测:通过频谱滤波器进行信号检测的技术^[9]。匹配滤波器是输出信噪比最大的最佳线性滤波器。匹配滤波是在已知主用户信号特征下最优的频谱检测技术,是一种相关检测。与能量检测技术相比,它具有时间短、检测精度高的优势。但是它需要主用户信号的详细特征,如果需要对多个主信号进行检测,则需要配置多个滤波器,执行成本将大大增加,因此其应用场合也受到很大的限制。