

认知协作通信能效优化

陈宏滨 赵 峰 黄世伟 著



科学出版社

认知协作通信能效优化

陈宏滨 赵 峰 黄世伟 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统诠释了认知协作通信的概念、关键技术及能效优化。全书共 14 章, 内容包括: 认知无线电、协作通信和绿色通信的概念、关键技术和应用; 单无线电单中继协作感知的能效优化; 单无线电多中继协作感知的能效优化; 单无线电中继协作感知与传输的联合优化; 双无线电中继协作感知的性能优化; 群频谱共享的频谱感知节能调度; 认知传感器网络中的频谱感知节能; 认知中继网络中协作传输的中断性能; 放大转发协作通信的频谱效率和能效平衡; 能量获取无线通信发射机的切换调度; 能量获取中继协作通信的最优功率分配; 区域覆盖的能量获取传感器网络休眠调度; 目标跟踪的能量获取传感器网络休眠调度; 无线信息和能量传输的最优时间分配。

本书可供从事认知无线电、协作通信、绿色通信研究和开发的科研人员参考, 也可供高等院校通信、信息工程及相关专业的教师、研究生和高年级本科生使用。

图书在版编目(CIP)数据

认知协作通信能效优化 / 陈宏滨, 赵峰, 黄世伟著. -- 北京: 科学出版社, 2015.12

ISBN 978-7-03-046769-0

I. ①认… II. ①陈… ②赵… ③黄… III. ①通信工程—研究生—教材 IV. ①TN91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 307240 号

责任编辑: 潘斯斯 李 清 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 徐晓晨 / 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>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 12 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2015 年 12 月第一次印刷 印张: 17 1/2

字数: 415 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

随着无线通信技术的快速发展，各种新的多媒体应用不断涌现，其高速率的通信需要很宽的频带支持。但是，过去政府对频谱资源采用固定的授权分配方式，剩下的空闲频带不多，而已经分配的频带又没有得到高效利用。为此，迫切需要一种技术来提高频带利用率或者寻找新的空闲频带，以解决频谱匮乏的难题。认知无线电技术有望实现这个愿景。它允许未授权用户机会式接入空闲的授权用户频带或者共享授权用户的频带，以利用时间或者空间上短暂的频谱空隙，提高频谱利用率。认知无线电是第 5 代移动通信(5G)的支撑技术，预期可实现多种网络技术的融合，突破现有频谱资源的制约，实现全频谱通信。2013 年 5 月，韩国三星电子有限公司宣布成功开发 5G 的核心技术，预计将于 2020 年开始推向商业化。该技术可在 28GHz 超高频段以 1Gbit/s 以上的传输速率传送数据，且最长传送距离可达 2 公里。2013 年 11 月，华为宣布将在 2018 年前对 5G 技术进行研发与创新，并预言在 2020 年用户会享受到 20Gbit/s 的商用 5G 移动网络。

认知无线电的关键技术包括频谱感知、频谱共享和频谱移动。频谱感知是认知无线电系统实现的前提，但是单用户频谱感知因受噪声不确定性、信道阴影和衰落等因素影响，其性能难以达到要求。协作频谱感知利用多个感知用户的空间分集，能够很大程度上提高感知性能。然而，协作频谱感知以消耗更多资源为代价，甚至可能抵消性能增益。在终端日益小型化和电池有限供电的背景下，有必要研究协作频谱感知的性能和能耗平衡问题。频谱共享主要有覆盖式和衬垫式两种。覆盖式频谱共享是指当授权用户不活跃时非授权用户占用授权用户的频带。衬垫式频谱共享是指非授权用户共享授权用户的频带同时约束自身的发射功率以不对授权用户造成有害干扰。在衬垫式频谱共享系统中，未授权用户在发送自身数据的同时，可以协助授权用户发送数据，从而提高整体吞吐量。另外，还可以引入中继协助授权用户或者(和)未授权用户发送数据，从而提高吞吐量，平衡授权用户和未授权用户的性能。但是，协作频谱共享显然会增加资源消耗，其性能和能耗平衡问题需要深入探讨。

协作通信通常指只有单根天线的节点按照一定方式共享彼此的天线从而形成虚拟多输入多输出(MIMO)系统，获得发射分集增益。从更广的范围来看，协作通信还包括协作媒质接入控制、协作路由、网络协议跨层协作、网络协作、能量协作等。各种拥有相似资源和意愿的节点都可以发起和参与协作。协作通信不仅应用于协作频谱感知和协作频谱共享，在其他领域也有广泛的应用，例如协作多点传输(CoMP)、蜂窝中继等。这些协作通信方式同样存在保持性能的同时尽量降低能耗的问题。未来 5G 移动网络需要破解大规模、多维度节点以及网络协作的难题，从而以有限的资源换取尽可能高的分集增益，最大限度提高系统容量和吞吐量。

绿色通信是在节能减排、可持续发展大环境下产生的新通信理念，其目的是在提供用户满意性能的同时尽量降低能耗和碳排放。绿色通信用到的主要技术包括低功耗电子技术、站点休眠调度、发射功率控制、新能源利用等。近年来，绿色通信在传感器网络、

能量获取无线通信、智能电网、蜂窝网等领域得到充分体现，是 5G 移动网络的发展趋向。2011 年，国家 973 项目“能效与资源优化的超蜂窝移动通信系统基础研究”提出若干绿色移动通信的发展思路，包括控制与业务分离、蜂窝变焦、按需适度服务等。在认知无线通信系统中，通过资源认知和单元协作，就有可能实现绿色通信的目标。

著者根据目前认知无线电、协作通信和绿色通信的技术发展以及近年来所取得的一些研究成果，编写了这本专门介绍认知协作通信能效优化技术的书籍。

本书研究内容得到国家自然科学基金项目(编号 61162008、61172055、61471135)和广西自然科学基金杰出青年基金项目(编号 2013GXNSFGA019004)的资助，在此特别表示感谢。在本书的编写过程中，著者参阅了大量中英文参考文献，在此对原作者表示感谢。

由于认知无线电技术、协作通信技术和绿色通信技术正在不断发展，再加上著者学识有限，书中错误在所难免，敬请广大读者批评指正。欢迎读者来信讨论其中的技术问题，联系方式：chbscut@guet.edu.cn。

著者 陈宏滨
2015 年 7 月
于桂林电子科技大学

目 录

前言

第 1 章 认知无线电、协作通信和绿色通信	1
1.1 引言	1
1.2 认知无线电	3
1.3 协作通信	8
1.4 绿色通信	8
1.5 本章小结	9
参考文献	9
第 2 章 单无线电单中继协作感知的能效优化	13
2.1 引言	13
2.2 协作感知模型	14
2.2.1 感知性能分析	15
2.2.2 感知能耗分析	17
2.3 感知性能和能耗的折中	17
2.3.1 优化问题	17
2.3.2 次用户最小吞吐量要求的影响	19
2.4 仿真结果	20
2.5 本章小结	24
参考文献	25
第 3 章 单无线电多中继协作感知的能效优化	27
3.1 引言	27
3.2 协作感知模型	28
3.2.1 感知性能分析	29
3.2.2 感知能耗分析	31
3.3 感知性能和能耗的折中	31
3.4 仿真结果	34
3.5 本章小结	36
参考文献	37
第 4 章 单无线电中继协作感知与传输的联合优化	39
4.1 引言	39

4.2	协作感知与传输模型	40
4.2.1	感知性能分析	42
4.2.2	认知用户吞吐量分析	43
4.3	感知性能和次用户吞吐量的折中	43
4.4	仿真结果	46
4.5	本章小结	48
	参考文献	48
第 5 章	双无线电中继协作感知的性能优化	50
5.1	引言	50
5.2	协作感知模型及感知性能分析	51
5.3	中继功率分配	53
5.3.1	峰值功率约束下的最优功率分配	53
5.3.2	平均功率约束下的最优功率分配	56
5.4	仿真结果	57
5.4.1	虚警概率的理论结果和仿真结果对比	57
5.4.2	多种信道条件对性能的影响	58
5.4.3	最优功率分配和等功率分配对比	60
5.5	本章小结	61
	参考文献	62
第 6 章	群频谱共享的频谱感知节能调度	64
6.1	引言	64
6.2	单节点频谱感知调度	65
6.3	感知性能分析	66
6.3.1	网络中心角度的分析	66
6.3.2	用户中心角度的分析	67
6.4	多种因素对频谱感知调度的影响	68
6.4.1	认知用户的流量类型	68
6.4.2	感知信道质量	69
6.4.3	感知结果广播	69
6.5	多节点频谱感知调度	69
6.6	仿真结果	70
6.6.1	单节点频谱感知调度	70
6.6.2	多节点频谱感知调度	72
6.7	本章小结	76
	参考文献	76
第 7 章	认知传感器网络中的频谱感知节能	78
7.1	引言	78

7.2	感知信号量化的单用户频谱感知.....	79
7.2.1	单用户频谱感知方案	79
7.2.2	性能分析	80
7.2.3	仿真结果	81
7.3	感知信号量化的协作频谱感知	83
7.3.1	协作频谱感知方案	83
7.3.2	性能分析	84
7.3.3	仿真结果	84
7.4	本章小结	86
	参考文献	86
第 8 章	认知中继网络中协作传输的中断性能	88
8.1	引言	88
8.2	平衡主用户和次用户中断性能的中继协作传输	89
8.2.1	系统模型	89
8.2.2	各个传输阶段的信号表示	90
8.2.3	中断性能分析	91
8.2.4	两种通信模型的介绍	94
8.2.5	仿真结果	96
8.3	同时协助主用户和次用户的中继协作传输	101
8.3.1	系统模型	101
8.3.2	各个传输阶段的信号表示	101
8.3.3	中断性能分析	103
8.3.4	不含协作的通信模型	106
8.3.5	仿真结果	107
8.4	本章小结	110
	参考文献	111
第 9 章	放大转发协作通信的频谱效率和能效平衡	113
9.1	引言	113
9.2	功耗背景	114
9.3	系统模型	114
9.3.1	非协作传输	115
9.3.2	无直传链路的中继协作传输	115
9.3.3	有直传链路的中继协作传输	116
9.4	频谱效率和能效平衡	116
9.4.1	非协作传输	116
9.4.2	无直传链路的中继协作传输	117
9.4.3	有直传链路的中继协作传输	120

9.4.4 传输策略选择	122
9.5 仿真结果	122
9.5.1 非协作传输	122
9.5.2 中继协作传输	124
9.5.3 三种传输策略比较	126
9.6 本章小结	126
本章附录 A	127
本章附录 B	128
本章附录 C	129
本章附录 D	130
本章附录 E	131
参考文献	132
 第 10 章 能量获取无线通信发射机的切换调度	135
10.1 引言	135
10.2 双能量获取发射机广播的切换调度	138
10.2.1 系统模型	138
10.2.2 优化问题	140
10.2.3 仿真结果	144
10.3 基于几何投影的多能量获取发射机切换调度	148
10.3.1 能量获取通信系统模型	148
10.3.2 基于几何投影的切换策略	150
10.3.3 仿真结果	154
10.4 多能量获取发射机广播的切换调度	155
10.4.1 系统模型	155
10.4.2 传输调度机制	157
10.4.3 仿真结果	161
10.5 本章小结	165
参考文献	165
 第 11 章 能量获取中继协作通信的最优功率分配	170
11.1 引言	170
11.2 能量获取中继网络的源和中继最优功率分配	171
11.2.1 系统模型	171
11.2.2 优化问题	174
11.2.3 仿真结果	175
11.3 能量获取认知中继网络的最优功率分配	177
11.3.1 系统模型	177
11.3.2 优化问题	180

11.3.3	仿真结果	182
11.4	本章小结	187
	参考文献	187
第 12 章	区域覆盖能量获取传感器网络休眠调度	189
12.1	引言	189
12.2	区域覆盖太阳能传感器网络中基于距离的休眠调度	190
12.2.1	算法提出的背景	190
12.2.2	太阳能传感器网络模型	191
12.2.3	区域覆盖时基于距离的休眠调度算法	194
12.2.4	仿真结果与分析	201
12.3	区域覆盖太阳能传感器网络中基于强化学习的休眠调度	205
12.3.1	算法提出的背景	205
12.3.2	基于距离的节点成组优先算子覆盖算法	205
12.3.3	基于 Q 学习的太阳能传感器网络	208
12.3.4	节点休眠调度算法步骤	212
12.3.5	仿真结果与分析	214
12.4	本章小结	218
	参考文献	218
第 13 章	目标跟踪能量获取传感器网络休眠调度	222
13.1	引言	222
13.2	目标跟踪的能量获取传感器网络启发式休眠调度	223
13.2.1	系统模型	223
13.2.2	启发式休眠调度算法	224
13.2.3	仿真结果与分析	226
13.3	改进的目标跟踪能量获取传感器网络休眠调度	229
13.3.1	系统模型	229
13.3.2	改进的休眠调度算法	230
13.3.3	仿真结果与分析	238
13.4	本章小结	243
	参考文献	243
第 14 章	无线信息和能量传输的最优时间分配	245
14.1	引言	245
14.2	完美信道下无线信息和能量传输的最优时间分配	247
14.2.1	系统模型	247
14.2.2	各个传输阶段的信号表示	248
14.2.3	优化问题的建立	250
14.2.4	优化问题的求解	251

14.2.5	仿真结果及分析	252
14.3	非完美信道下无线信息和能量传输的最优时间分配	255
14.3.1	系统模型	255
14.3.2	各个传输阶段的信号表示	256
14.3.3	优化问题的建立	258
14.3.4	优化问题的求解	259
14.3.5	仿真结果及分析	260
14.4	本章小结	262
	本章附录 A	263
	本章附录 B	264
	参考文献	265

第 1 章 认知无线电、协作通信和绿色通信

1.1 引言

随着人们对无线应用需求的增长,促使无线通信技术快速发展,频谱资源变得越来越稀缺。人们总是希望能够随时随地从因特网中获取信息,包括数据、语音和多媒体信息,希望能够在任何时间、任何地点与任何人进行通信,这种需求使得无线宽带业务、高速连接业务急剧增长,促使无线通信技术朝着移动、宽带、高速方向发展,需要大量的频谱资源来支撑。目前,电视广播网、第三代宽带移动通信网、无线城域网、无线局域网和无线个域网的共存,占用了相当多的频谱资源。然而,频谱资源是十分有限的,这导致频谱资源越发短缺。

频谱资源的短缺,一是由于无线通信业务的爆炸式增长,二是由于无线通信技术和本身的管理限制。无线通信技术和管理的限制主要表现在两个方面。一方面,由于天线和射频技术的制约,频谱资源的高频部分很少得到开发利用,目前无线通信系统主要集中在低频段。另一方面,在已开发利用的频谱资源低频段,由于无线通信管理的制约,大部分可用频段没有得到充分利用,而少部分可用频段却十分拥挤。目前,全世界各国主要采用固定的频谱分配制度,将频谱划分为两个部分:授权频段和非授权频段。大部分可利用的频谱资源被用于授权频段,如电视广播网频段、移动通信网频段。只有少部分可利用频谱资源被用作非授权频段,如工业、科学和医用开放频段(ISM, Industrial、Scientific、Medical 频段)。根据美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)的报告,授权频段的利用率只有 15%~85%^[1]。具有大量无线通信业务的无线城域网、无线局域网和无线个域网都主要使用非授权频段,使得这些频段异常拥挤,已趋于饱和。

根据传统的频谱分配方式,在某一地区内,某一频段只授权给单个无线通信网络使用。不管这个通信网络是否正在使用该频段,都不允许其他通信网络接入使用,这无疑降低了该频段的使用效率。为此,人们进行了大量努力,主要是通过频谱共享来提高频谱利用率。目前的频谱共享方式主要有:工业、科学、医用频段(ISM 频段)的开放接入,超宽带网络(Ultra-Wide Band, UWB)与传统窄带网络的共存技术。国际电信联盟指定 ISM 频段是免许可证的开放接入频段,允许多个网络同时接入共享。微波炉、蓝牙、ZigBee 和无线局域网(IEEE 802.11)均使用 ISM 频段。工作于 ISM 频段的无线网络,主要通过“载波侦听”技术来避免干扰,即在开始通信前先确定试图接入的频段是否被其他网络占用,如果未被占用则接入该频段,如果被占用则寻找另外的频段接入或者等候一段时间再接入。超宽带无线通信网络的工作频率从 3GHz 到 10GHz,与现有无线通信网络的工作频率是有部分重叠的。超宽带无线通信系统主要通过发送信号的低功率谱特性实现与现有无线通信网络的共存。超宽带信号是一种发射功率极低、频率覆盖范围极宽的无线

通信信号,一般采用纳秒级的窄脉冲信号。对于现有的无线通信网络,这种发射功率极低的信号相当于干扰噪声信号,如果其功率足够低则不会影响现有无线网络的正常通信。

目前,这些频谱共享技术虽然能够在一定程度上提高频谱利用率,但是小范围的改善提高还远远无法满足无线通信业务的巨大需求。ISM 开放频段带宽非常有限,无线城域网、无线局域网和无线个域网都在使用,使得 ISM 频段已趋于饱和状态。另外,尽管 UWB 信号的发射功率低,但是由于其频谱覆盖范围非常宽,与现有无线通信网络的工作频率发生重叠是不可避免的,甚至与多个网络的工作频率发生重叠。如何避免对多个网络造成干扰是一件非常困难的事情,UWB 系统与现有系统的共存与兼容是一个难题,需要新的解决方案。

在这样的背景下,为解决频谱短缺问题,认知无线电技术^[2]随之被提出。认知无线电技术着眼于占用了大量可用频谱资源的授权频段,使得非授权无线通信网络能够与授权无线通信网络兼容共存。在不干扰授权无线网络正常通信的前提下,非授权无线网络可以接入使用授权无线网络的频段,从而能够极大地提高授权频段的利用率,有效解决频谱资源紧张问题。认知无线电技术打破了旧的固定频谱分配方式,允许新的网络接入授权频段,而不是一个频段只允许一个网络使用。与此同时,认知无线电技术并不是要改造现有的无线通信网络,而是探索新的网络与之兼容,这无疑降低了改造成本,增加了可行性。这种新的非授权网络被称为次用户网络(或认知无线电网络),旧有的授权网络被称为主用户网络。

认知无线电技术主要目的是实现两种频谱共享方式^[3]:衬底式共享方式(Underlay)和覆盖式共享方式(Overlay)。衬底式共享方式是指认知无线电网络通过控制自身的发射功率,使其对主用户网络的干扰处于允许范围之内,而不影响主用户网络的正常通信。UWB 信号具有低功率谱特性,是实现衬底式共享方式的有力手段。认知无线电技术采用 UWB 信号实现衬底式共享方式的关键是解决 UWB 信号与主用户网络的兼容性,使其不妨碍主用户网络的正常通信。当然,认知无线电也可以采用其他信号实现衬底式共享方式,如一般的扩频信号。覆盖式共享方式是指认知无线电网络首先探测在某一地区某一时间段内未被主用户网络使用的频段,然后机会式地利用这些未被使用的频段传输自身的数据,使得主用户网络的授权频段得到充分利用。认知无线电技术实现覆盖式共享方式的关键是准确可靠地检测未被主用户网络使用的频段。事实上,从频谱的使用方式上说,认知无线电覆盖式共享方式类似于 ISM 频段的开放接入方式,但与之不同的是,认知无线电覆盖式共享方式需要解决自身与主用户网络的兼容性问题,主用户网络具有高优先级,认知无线电网络处于低优先级;当主用户网络重新使用其授权频段时,认知无线电网络需要及时退出该频段而切换到其他频段;而在 ISM 频段开放接入方式中,几个网络是对等的,处于同样的优先级,通过竞争方式使用该频段,任意一个网络都不需要为其他网络让步。另外一个不同点是,ISM 开放频段非常窄,可开发利用的频谱资源非常少,而认知无线电试图接入的主用户网络授权频段比较宽,可开发利用的频谱资源比较大,因此,认知无线电技术具有更大的潜力去提高频谱利用率、缓解频谱资源紧张问题。

除了提高频谱利用率,提高信息速率也可以提高通信系统的容量。提高信息速率的技术有很多,如多输入多输出(MIMO)、协作通信等。中继协作通信利用中继节点转发信息,能够提高接收端的信干噪比,获得协作分集增益。在认知无线电频谱感知时运用

协作通信技术,可以提高检测概率、降低虚警概率。在认知无线电频谱共享时运用协作通信技术,可以提高非授权用户的信息速率、减小对授权用户的干扰。因此,协作通信技术及其与认知无线电技术的结合,都具有较大的性能优势,可以部分解决目前无线通信系统难以满足用户高速率通信需求的难题。

但是,认知无线电技术和协作通信技术也会产生更大的信令开销和能耗。随着可持续发展理念的提出和全球非可再生能源的日益枯竭,各行各业都高度关注能耗,节能减排成为必须实现的目标。信息通信业相比其他行业能耗问题并不突出,但是它的能耗也不容忽视,而且对其他行业节能减排具有促进作用。认知无线电技术和协作通信技术在现有和未来的无线通信系统中得到了广泛的应用,已经成为蜂窝网、物联网的支撑技术。为此,认知无线电系统和协作通信系统的能效问题值得重点关注。我们需要通过架构设计和资源分配去降低认知无线电系统和协作通信系统的能耗,构建能效优化的认知协作通信系统。

1.2 认知无线电

认知无线电概念由 Mitola 博士在 1999 年最先提出,通过“无线电知识表示语言”使无线终端具有无线电环境意识能力,从而提高无线业务的灵活性,软件无线电是实现认知无线电的理想平台^[2]。2000 年,他在博士论文^[4]中进一步阐述了这个理论。Mitola 博士强调,通过软件无线电平台实现模拟数字硬件的软件化,提高无线通信技术的灵活性,通过基于模式的推理方式和网络进行交流,提高无线通信技术的智能性,可以说认知无线电是一种智能的软件无线电。总之,他认为认知无线电通过不断监测无线电环境的变化,并加以分析、学习和推理,进而调整自身的通信机制以适应环境的变化,实现灵活的、智能的无线通信。

FCC 从频谱利用率低下的角度出发,对认知无线电技术提出了新的注解^[1,5]。FCC 认为,认知无线电是实现动态频谱接入、提高频谱利用率的关键技术,提出采用认知无线电技术来实现频谱开放管理、实现频谱共享,一个新网络在不干扰已有授权网络正常通信的前提下可以接入授权用户的频段,以此来达到频谱的二次开发和重复利用。目前,对认知无线电的研究多数是基于 FCC 的观点。随后, Haykin 从信号处理角度全面描述了认知无线电的基本任务以及体系架构^[6]。他认为,认知无线电需要解决几个主要问题:“无线场景分析、信道状态估计和预测建模、功率控制和动态频谱管理”。

根据 FCC 的观点和 Haykin 的分析,认知无线网络需要具备两个主要的功能:认知能力和重构能力^[6]。

认知能力:认知能力是指认知无线网络捕捉和感知无线环境变化的能力。这种能力不是通过简单的探测某些感兴趣频带的功率而得到频谱状态信息,而是通过一种更复杂、更高级的技术来感知无线环境的时间和空间变化,从而避免对其他用户产生干扰。通过这种能力,认知无线网络就能够探测出在特定时间和空间上未被占用的频段,并选择最适合的频段和传输参数来调整自身的通信机制。认知无线网络的认知能力,使其能够实时地感知无线环境并动态地适应无线环境,这需要一种自适应机制,被称为认知循环^[6]。认知循环主要包括三个阶段:频谱感知、频谱分析和频谱决策。在频谱感

知阶段，认知无线网络探测可利用的空闲频带，并获取所需要的其他相关信息，主要目的是探测、发现空闲频谱。在频谱分析阶段，认知无线网络根据探测到的空闲频谱，通过一定的算法估计分析这些空闲频谱的特征，包括空闲频谱的带宽、干扰噪声基底等。在频谱决策阶段，认知无线网络探测到空闲频谱并分析其特征之后，根据认知用户的需求以及这些空闲频谱的特征，确定认知用户的传输带宽、传输模式和传输速率，并选择适合其通信的空闲频带来完成认知用户的数据传输。另外，无线电环境是随时间和空间不断变化的，认知无线电必须不断跟踪并调整参数适应这种变化。主用户的重新出现、主用户的位置变化、认知用户的移动都会引起认知无线网络周围环境的变化。如果认知用户正在使用的某个频段突然变得不可利用了，则认知无线网络需要通过频谱移动性管理快速切换到其他可利用频段上进行通信，以实现无缝传输。认知用户需求的变化，也需要认知无线网络做出相应调整，以达到最佳网络传输状态。

重构能力：重构能力是指认知无线网络在不改变任何硬件的条件下调整传输参数以适应环境变化的能力。认知无线网络主要通过软件编程的方式实现宽频带传输，并支持多种通信体制，类似于软件无线电技术。重构参数主要包括：工作频带，认知用户可以根据周围的无线电环境及自身的需求，选择适合的工作频带进行传输，当正在使用的工作频带不可用时，可以改变切换到其他的频带；调制方式，认知用户能够根据自身需求和信道条件调整通信调制方式，对于时延敏感业务，传输速率比差错率更重要，则需要选择频谱效率较高的调制方式，而对于丢包敏感业务，差错率比传输速率更重要，则需要选择误码率较低的调制方式；传输功率，认知用户的传输功率可以在功率限制范围内重新配置，当不需要较高的功率进行传输时，可以降低传输功率，以减少干扰，使得更多的用户可以共享频谱。除此之外，认知无线电能够让不同的通信系统实现互联。重构这些参数，不仅可以在通信连接之前进行，也可以在通信过程中进行。根据频谱特性，认知无线电通过重构能力，可以切换到不同的频带上传输数据，并能够调整相应的发射机、接收机工作参数以及通信协议参数、调制参数，以适应无线电环境的多变性和可用频谱的时变性。

下面简要介绍实现认知无线电功能的关键技术：频谱感知、频谱分析和决策、频谱移动。

频谱感知：频谱感知的主要目的是探测授权频段中未被授权用户使用的频段，即探测空闲频段。通过改造已有的授权用户系统来实现多个用户系统共享频谱，其成本相当高。因此，认知无线网络需要在感兴趣频带内监测主用户的活动状态，当主用户不使用某个频带时，认知用户才能够接入该频带，以实现与已有网络的兼容与共存，而不影响已有网络的正常通信。另外，当授权用户在某个使用频段内重新出现时，认知用户需要及时退出该频段，切换到其他频段，防止对授权用户造成干扰，这要求认知无线网络实时连续地侦听频谱。频谱感知技术主要有匹配滤波器检测、能量检测和特征值检测等^[7,8]。匹配滤波器检测方法需要事先知道主用户的信号波形(完整信息)，是最优的检测方法。但在实际应用中，主用户信号波形通常难以获得，所以业界并不是非常推荐这种方法。能量检测方法不需要事先知道主用户的信号特征，属于一种盲检测方法。它只需要收集被检测频带内的信号能量而不需要复杂的信号处理，所以受到了广泛关注。特征值检测方法需要事先知道主用户的部分信号特征，能够从噪声信号中区分出主用户信号，

具有抗噪声性能,但其复杂度比能量检测方法要大,尽管有缺陷,但这种方法凭借较好的检测性能也受到了一定关注。根据用户之间是否共享频谱感知结果,频谱感知技术可以大致分为:非协作频谱感知(单节点频谱感知)和协作频谱感知^[9-11]。在远距离和低信噪比条件下,非协作频谱感知通常难以获得准确可靠的频谱感知结果,而协作频谱感知通过利用空间分集增益,能够极大地提高频谱感知结果的准确性、改善频谱感知性能,因而成为一个研究热点。

频谱分析和决策:在认知网络中,通过频谱感知获得的空闲频段包括授权频段和非授权频段。在授权频段内,认知用户需要确保授权用户不受到有害干扰;在非授权频段内,认知用户与其他用户处于同样的优先级,不需要保证其他用户的正常通信,它们之间是一种竞争关系。因此,认知用户需要采用不同的方式去使用授权频段和非授权频段。另外,空闲频谱分布在很宽的范围内,随着时间和空间表现出不同的特性。频谱分析的确定就是要确定特定频段的频谱特性,可以通过信道容量、信道误码率、路径损失、信道占用时间、信道延时等参数来衡量^[12]。认知无线网络根据频谱感知结果进行学习和推理分析,建立无线频谱环境知识库,并由此可获得频谱特性。频谱决策是指,根据空闲频段的频谱特性和认知用户的服务质量要求,认知无线网络为用户选择合适的工作频段,并确定合适的传输速率、调制方式和带宽等参数。频谱决策需要综合考虑用户之间的公平性、信道质量和用户服务质量需求,以及主用户的活动特性。主用户的活动特性也会影响认知网络的决策行为,例如,主用户占用某个频段的时间长短,以及使用某个频段的频繁程度决定了空闲频谱的持续时间(认知用户可以利用的时间长短)和认知用户切换频谱的次数^[13]。

频谱移动:频谱移动是指当认知用户正在使用的频段被授权用户重新占用、或者由于用户的位置变化和信道的时变特性等因素使该频段变得不适合传输时,认知用户需要及时退出该频段,并寻找另外一个合适的频段进行传输,也被称为频谱切换^[14]。在授权频段内,认知用户处于低优先级,授权用户处于高优先级,所以当授权用户出现时,认知用户必须及时退出,或者调整传输功率和调制方式,使得授权用户不受到有害干扰。认知用户退出某个频段后,还需要根据自身的需求和其他频段的频谱特性,从中选择合适的工作频段继续进行传输,并重新调整传输参数以适应新的工作频段。研究快速的无缝频谱切换方法对于认知无线网络避免干扰主用户,并保证自身传输质量具有重要意义。

认知无线电是实现动态频谱接入和频谱共享的重要手段,影响着未来无线通信技术的发展,引起了广泛关注。频谱管理部门、标准化组织、研究机构和大学以及一些通信公司开展了大量研究。

2003年,FCC提出了干扰温度概念,用以量化和管理干扰,认知用户对主用户的干扰不能超过干扰温度容限。2004年,FCC提议认知无线电可以工作在电视广播频段。FCC认为,电视广播频段最适合于认知无线电技术,因为电视广播频段的频谱利用率很低,而且适合于无线通信传输。

2004年,美国电气电子工程师协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)成立了802.22工作组^[15],该工作组制定了基于认知无线电的空中接口标准,主要利用电视广播频段的空闲频谱,实现无线区域网络(Wireless Regional Area Networks, WRAN)与电视广播网络的共存。2005年,IEEE成立了IEEE 1900工作组,主要研究高

级频谱管理技术,并探讨认知无线网络和其他无线通信网络的共存问题。另外,IEEE 802.16h、IEEE 802.11h 和 IEEE 802.11y 工作组也关注于认知无线电技术,通过利用认知无线电技术寻找新的可利用频谱,提高网络容量。除此之外,为推动认知无线电技术的研究,IEEE 还组织了两个关于认知无线电的国际会议,即 DySPAN 和 CROWNCOM。

各国政府也高度重视认知无线电技术的发展,组织了许多大型项目来开展研究。2003 年,美国国防部高级研究计划机构(Defense Advanced Research Project Agency, DARPA)建立了下一代通信计划(neXt Generation program, XG),致力于开发认知无线网络。欧盟成立了端到端的可重配置项目(End to End Reconfigurability, E2R)。2005 年,我国也开始在国家 863 计划中进行认知无线电的研究。在国家大型项目的支持和推动下,一些研究机构和大学也针对认知无线电技术进行了大量研究。美国加州大学的伯克利分校构建了 CORVUS 系统^[16]和仿真平台(Berkeley Emulation Engine, BEE2),可以对各种频谱侦听算法进行仿真和分析。德国 Karlsruhe 大学提出频谱池系统^[17,18]。维吉尼亚工学院 CWT (Center for Wireless Telecommunications)关注于遗传算法认知模型的研究以及认知节点引擎实验床的开发。

在国内,随着认知无线电技术的快速发展,认知无线电技术也引起了国内学术界的关注。国内高校也发表了一些专著^[19,20]和科研论文^[21,22],对认知无线电技术的发展做出了贡献。从 2005 年起,西安交通大学、西安电子科技大学和成都电子科技大学在国家 863 计划项目的资助下开始研究认知无线电。2008 年,国家 973 项目也开始资助认知无线电领域的研究。2008 年,国家自然科学基金在认知无线电领域设立了重点项目群,在认知无线电中继协作通信以及无线频谱资源动态管理方面开展研究。此外,一些通信公司(如中国移动、华为等)也参与其中,在频谱管理、频谱分配和认知网络体系结构方面开展研究。

从技术层面上看,认知无线电研究已经取得了很多成果。在频谱感知领域,针对主用户信号的先验知识以及统计特征,提出了匹配滤波器检测、能量检测、循环谱特征检测^[7,8]等多种频谱感知技术。文献[8]比较分析了各种频谱感知技术的复杂度和精确性。针对频谱感知和数据传输的调度问题,即什么时候进行频谱感知、什么时候进行数据传输,提出了很多优化算法。文献[23]提出了短时间粗略感知和长时间精确感知的联合方案,以满足检测时间和检测性能的双重要求。文献[24]研究了最优的感知时间问题,使得在确保主用户受到一定程度保护的前提下,次用户的吞吐量达到最大。为了克服无线信道的噪声不确定性、多径衰落和阴影衰落的不利影响,人们提出协作频谱感知技术,通过利用空间分集增益来提高频谱感知性能^[9,10]。然而,协作频谱感知带来协作增益的同时,也引入了许多协作开销问题,文献[10]全面总结了协作增益和开销问题。虽然频谱感知技术研究已经取得了许多研究成果,但是依然面临很多挑战。目前,射频前端的处理速度是十分有限的,这使得同时感知整个频带(宽带感知)变得非常困难。一些文献将整个频带划分为多个窄频带进行处理^[25,26],但是这样会增加射频器件和感知时间,使得宽带感知依然难以应用在实际系统中。另外,在协作频谱感知中,如何建立感知节点和融合中心之间的控制信道依然是一个开放性的研究话题。目前的大部分工作假定认知网络中具有专用的公共控制信道,这无疑会增加额外的频谱资源消耗。文献[27]研究了一种自组织网络中的公共控制信道建立算法,这种算法基于分组和组间配合方式,组内邻居节