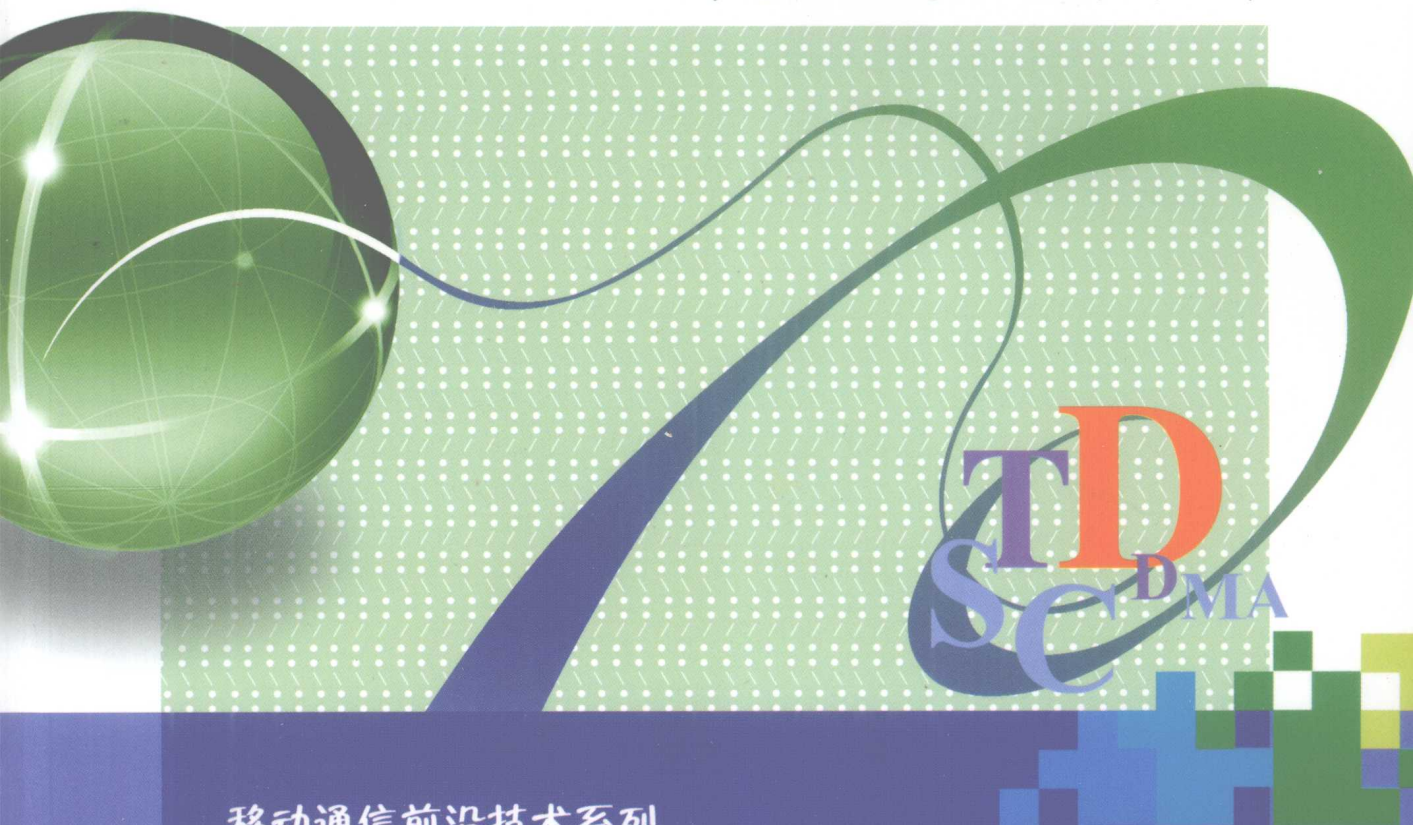


► 21世纪通信网络技术丛书



移动通信前沿技术系列

认知无线电网络 技术及应用

Cognitive Radio Network
Technologies and Applications

郭彩丽 冯春燕 曾志民 著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

21 世纪通信网络技术丛书
——移动通信前沿技术系列

认知无线电网络技术及应用

Cognitive Radio Network Technologies and Applications

郭彩丽 冯春燕 曾志民 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

认知无线电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。本书从认知无线电的基本思想的提出到目前国内外积极开展研究的过程中, 就如何准确感知频谱, 如何进行干扰估测, 如何使用和组建认知无线网络, 如何将认知无线电推向实际应用展开了详细的论述。本书包括 10 章, 内容涵盖了认知无线电和认知无线网络的基础知识和关键技术, 包括频谱感知、物理传输技术、无线资源管理、路由技术及传输协议、跨层设计及优化、网络安全, 认知无线网络应用, 最后展望了未来无线通信系统中认知无线电技术的研究及应用前景。

本书可作为高等院校通信等相关专业高年级本科生或研究生教材, 以及通信新技术培训参考书, 也可作为从事无线通信领域研究的科研人员与工程技术人员的技术参考用书。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有, 侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

认知无线网络技术及应用/郭彩丽, 冯春燕, 曾志民著. —北京: 电子工业出版社, 2010.7

(21 世纪通信网络技术丛书——移动通信前沿技术系列)

ISBN 978-7-121-11213-3

I. ①认… II. ①郭… ②冯… ③曾… III. ①无线电通信—通信网 IV. ①TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 122571 号

策划编辑: 田宏峰

责任编辑: 窦 昊 特约编辑: 牛雪峰

印 刷: 北京天宇星印刷厂

装 订: 三河市皇庄路通装订厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 23.25 字数: 595 千字

印 次: 2010 年 7 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 59.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

出版说明

通信网络技术是当今发展最快、应用最广和最前沿的通信领域之一。通信技术发展到今天,已经不再是传统意义上充满神秘色彩的深奥技术了,它已经与日常的应用密不可分。可以说,网络的出现,使通信技术得以有了广阔的用武之地。正是由于有了固定电话网、移动通信网和 Internet,使通信技术的应用在这些平台上有了用武之地,渗透到我们日常生活的方方面面。

为了促进和推动我国通信产业的发展,电子工业出版社通信分社特策划了一套《21 世纪通信网络技术丛书》。这套丛书根据不同的层面,又细分为三个系列:《移动通信前沿技术系列》、《3GPP LTE 无线通信新技术系列》和《网络通信与工程应用系列》。

《移动通信前沿技术系列》是从移动通信技术(3G 技术)的应用现状与发展情况出发,全面介绍当今移动通信领域涉及的关键技术与热点技术,例如,软件无线电;移动 IP 技术;移动数据通信;WCDMA;TD-SCDMA;cdma2000;移动通信系统网络规划与优化;智能天线技术;认知无线电技术;WiMAX、WiFi、ZigBee 宽带无线接入技术;UWB 技术;UMTS 技术;Ad Hoc 技术等。

《3GPP LTE 无线通信新技术系列》是以 3GPP 中 LTE 标准的关键技术在无线、宽带、高速、资源中的有效管理和利用,以及在 B3G/4G 无线通信领域中的应用为主。LTE 作为 3G 技术的一个重要的长期演进计划,代表了国际无线通信领域的最新发展需求和解决方案,例如,基于 OFDM 的上、下行(HSxPA)的多址接入技术、随机接入技术、多天线 MIMO 技术、多链路自适应技术、多播技术、功率控制技术、宽带无线网络的安全性、可移动性、可管理性、高效信源与信道编码和调制 MQAM 技术等。

《网络通信与工程应用系列》是以技术为先导,以构建网络的体系结构、标准、协议为目标所开展的对现代无线、移动、宽带通信网络的规划与优化,以及结合工程应用的方向所提出来的。例如,无线网状网、WLAN、无线传感器网络、3G/B3G/4G 通信网工程设计与优化、卫星移动通信网、三网融合技术、网络安全新技术与新策略、RFID 应用网络、下一代基于 SIP 的统一通信、光网络与光通信等。

本套丛书依托各高等院校在通信领域从事科研、教学、工程、管理的具有丰富的理论与实践经验的专家、教授;各研究院所的研究员;国内有一定规模和研发实力的科技公司的研发人员,以及国外知名研究实验室的专家、学者等组成编写和翻译队伍,力求实现内容的先进性、实用性和系统性;力求内容组织循序渐进、深入浅出、理论阐述概念清晰、层次分明;力求很强的可读性和可操作性。

本套丛书的主要读者对象是广大从事通信网络技术工作的各科研院所和公司的广大工程技术人员;各高等院校的专业教师和研究生;刚走上工作岗位的大学毕业生;以及与此相关的其他学科的技术人员。

本套丛书从 2008 年上半年开始将陆续推出,希望广大读者能关注它,多对本套丛书提出宝贵意见与建议,欢迎通过电子邮箱 wchn@phei.com.cn 进行探讨、交流和指正,以便今后为广大读者奉献更多、更好的优秀通信技术类图书。

电子工业出版社
通信出版分社

前 言

无线频谱是不可再生的宝贵资源。提高频谱资源利用率以满足日益增长的无线通信业务需求是无线通信领域永恒的课题。可以说,无线通信的发展历史就是解决频谱有效利用的历史。传统提高频谱利用率的方法是采用先进的通信理论与技术,但受限于香农信道容量理论极限值,不能从根本上解决频谱资源紧张问题。随着未来无线通信宽带化的发展趋势,WiMAX(Worldwide Interoperability for Microwave Access)、LTE(Long Term Evolution)、UWB(Ultra-Wide Band)等新技术、新业务不断涌现,频谱需求呈指数迅猛增长。频谱资源的供需矛盾限制了无线通信业务应用的持续发展。

与此同时,近期国内外大量研究表明,在传统“条块分割”的静态频谱分配政策下,全球频谱资源的利用表现出高度的不均衡性。一方面,一些非授权频段业务繁忙、占用拥挤;另一方面,一些授权频段,尤其是信号传播特性比较好的低频段,其频谱利用率极低,频谱资源存在巨大“浪费”。这就迫切需要一种新的技术将“浪费”的频谱资源充分利用起来,认知无线电技术应运而生。它通过对授权频谱的“二次利用”,可有效缓解频谱资源紧缺问题,因此被预言为未来最热门的无线技术。

认知无线电技术是无线通信发展的一个新的里程碑,其将来的广泛应用必将带来无线通信领域历史性的变革。目前认知无线电的研究正在全世界范围内积极开展,且发展迅速,无论是专家学者还是国内外频率管理委员会、标准化组织、研究机构、企业均给予了极大的关注。但认知无线电技术本身是一个有相当难度的课题,如何准确感知频谱、有效估测干扰,如何组建认知无线网络,这些问题一直以来都困扰着广大的研究者。在我国大力发展无线通信和急需培养前沿通信专业人才的今天,编写一本结构清晰、内容全面、汇集认知无线电研究进展、体现认知无线网络关键技术研究难点、充分挖掘认知无线网络应用前景的参考书,对于推动无线通信的发展具有重要的学术和应用价值。此外,目前在认知无线电领域虽已取得一系列可喜研究成果,但离工业界所期望的能“呼之欲出”的实用还有一段距离。为推动认知无线电技术进一步从目前的研究实验最终走向真正实用,相关的通信企业开发人员也迫切需要一本能够呈现认知无线网络关键技术及应用研究成果进展的书,以帮助他们全面深入地了解这项新的技术,从而指导实际的工程实践。

鉴于上述原因,本书在编著过程中突出以下三点:注重认知无线网络知识架构的体系性,纳入了认知无线网络从物理层到应用层所包含的频谱感知、物理传输技术、无线资源管理、路由技术与传输协议、跨层设计及优化、网络安全等技术内容;在书的编著过程中同时注意不局限于原理性介绍,穿插讲述一些认知无线电在未来无线通信中的应用实例,并设立典型的认知无线网络这一章节,将近几年来无论是在实际网络中已有应用的技术还是在研究中已取得成果的技术均体现在书中;本书在最后一章还引入了认知网络,阐述了认知无线网络的未来演进趋势,充分体现了内容的新颖性和前瞻性。

本书的几位作者均为国内最早从事认知无线电领域的研究人员,本书的内容和素材主要是基于作者所领导的研究室近几年在认知无线电领域的研究成果和积累,包括对国内外发展

和研究现状的最新了解和掌握、与国内外学者交流、承担各种科研项目、教学实践、研究室博士和硕士研究生的学位论文等。编写此书期望能够将作者近几年从事认知无线电技术研究、教学实践过程中积累下来的研究成果与读者分享。

本书共分为 10 章。第 1~2 章介绍认知无线电和认知无线网络的基础知识；第 3~8 章讲述认知无线网络的关键技术，包括频谱感知、物理传输技术、无线资源管理、路由技术及传输协议、跨层设计及优化、网络安全；第 9 章介绍了典型的认知无线网络应用；第 10 章讲述了认知网络，并展望了未来无线通信中认知无线电及认知网络的应用前景。

本书可作为高等院校通信等相关专业高年级本科生或研究生教材，以及通信新技术培训参考书，也可作为从事无线通信领域研究的科研人员与工程技术人员的技术参考用书。

在本书的撰写过程中，王悦、刘芳芳、张旭、徐咏梅、史松松、候志宏、卞宏梁、王圣森、蔺琳等参与了研究实践及部分章节的写作，在此向他们表示衷心的感谢。

本书编写得到国家“863”计划重点项目“频谱资源共享无线通信系统”（2009AA011802）、国家自然科学基金项目“基于时域频谱利用概率分布曲线拟合的频谱检测研究”（60772110）、“极化域频谱感知理论与技术研究”（60902047）的大力支持，特此表示感谢。

认知无线电技术在不断发展，加之作者的学识有限，书中疏漏不妥之处，恳请读者指正。

目 录

第 1 章 概论	(1)
1.1 无线通信与频谱资源	(1)
1.2 高效频谱利用技术	(2)
1.3 频谱共享技术	(3)
1.3.1 动态频谱分配	(3)
1.3.2 免许可开放接入	(3)
1.3.3 分级共享接入	(4)
1.4 认知无线电的产生	(5)
1.5 认知无线电研究现状	(6)
1.5.1 标准化进展	(6)
1.5.2 代表性研究成果	(8)
1.6 认知无线电与认知无线网络	(9)
参考文献	(9)
第 2 章 认知无线网络基础	(11)
2.1 认知无线电技术	(11)
2.1.1 认知无线电的定义	(11)
2.1.2 理想认知无线电	(12)
2.1.3 频谱感知认知无线电	(14)
2.1.4 认知无线电的物理实现	(16)
2.1.5 认知无线电在无线通信中的应用	(17)
2.2 认知无线网络	(24)
2.2.1 现存认知无线网络	(25)
2.2.2 认知无线网络关键问题	(27)
参考文献	(30)
第 3 章 频谱感知	(31)
3.1 概述	(31)
3.2 频谱感知模型	(31)
3.2.1 频谱机会	(32)
3.2.2 二元假设频谱感知模型	(32)
3.3 频谱感知分类	(33)
3.3.1 辅助频谱感知	(33)
3.3.2 独立频谱感知	(35)

3.4	基于发射机信号的检测	(36)
3.4.1	匹配滤波器检测	(36)
3.4.2	能量检测	(38)
3.4.3	循环平稳特征检测	(41)
3.4.4	协方差盲检测	(42)
3.4.5	延时相关性检测	(43)
3.4.6	两步检测	(43)
3.5	基于接收机信号的检测	(44)
3.5.1	基于干扰温度估计的检测	(45)
3.5.2	基于接收机本振泄漏的检测	(47)
3.6	合作检测	(49)
3.6.1	单用户检测局限性及合作检测增益	(49)
3.6.2	分布式多用户合作检测	(50)
3.6.3	协作分集式合作检测	(57)
3.7	MAC 层及跨层检测	(59)
3.7.1	检测模式	(60)
3.7.2	检测周期	(62)
3.7.3	检测时长	(64)
3.7.4	检测信道	(66)
3.7.5	检测静默周期	(68)
3.8	多域全认知技术	(69)
3.8.1	信号空间多维感知	(70)
3.8.2	基于链路的感知	(71)
3.8.3	基于网络的感知	(73)
3.8.4	基于用户的感知	(74)
3.9	现有标准中的频谱感知	(75)
3.9.1	IEEE 802.11k	(75)
3.9.2	IEEE 802.15.1	(75)
3.9.3	IEEE 802.22	(76)
	参考文献	(77)

第 4 章 物理传输技术 (82)

4.1	认知 OFDM (Cognitive OFDM) 传输技术	(82)
4.1.1	认知 OFDM 概述	(82)
4.1.2	认知 OFDM 中的关键技术	(86)
4.2	认知 UWB (Cognitive UWB) 传输技术	(100)
4.2.1	认知 UWB 概述	(100)
4.2.2	认知 UWB 传输波形设计	(103)
4.2.3	UWB 传输技术在认知无线网络中的应用	(107)

4.3	变换域通信系统 (TDCS)	(108)
4.3.1	TDCS 在认知无线电中的适用性	(109)
4.3.2	TDCS 在认知无线电中的实现	(109)
4.3.3	认知无线网络环境中的 TDCS 性能分析	(112)
4.3.4	基于 OFDM 的 TDCS	(113)
4.4	认知无线电的信道编码技术	(115)
4.4.1	纠错编码	(115)
4.4.2	纠删编码	(121)
4.5	认知 MIMO 技术	(127)
4.5.1	认知 MIMO 概述	(127)
4.5.2	认知 MIMO 的研究热点	(128)
4.5.3	认知 MIMO 传输系统实例	(133)
4.6	认知无线电的链路自适应技术	(135)
4.6.1	概述	(135)
4.6.2	认知无线电的时域链路自适应 (TDLA)	(136)
4.6.3	认知 OFDM 的链路自适应	(141)
	参考文献	(145)

第 5 章 无线资源管理 (151)

5.1	概述	(151)
5.2	频谱分析	(152)
5.2.1	频谱分析分类	(152)
5.2.2	频谱特征参数	(154)
5.2.3	信道容量	(159)
5.3	频谱决策	(160)
5.3.1	概述	(160)
5.3.2	决策的优化目标: 本地与全局	(162)
5.3.3	决策中的协调机制	(166)
5.4	接入控制	(167)
5.4.1	接入控制的特点	(167)
5.4.2	与授权用户协调的接入控制	(168)
5.4.3	透明接入控制	(169)
5.5	频谱分配	(172)
5.5.1	频谱分配技术分类	(172)
5.5.2	完全受限频谱分配	(174)
5.5.3	部分受限频谱分配	(185)
5.6	功率控制	(189)
5.6.1	与传统网络功率控制的区别	(190)
5.6.2	基于合作的功率控制	(190)
5.6.3	基于非合作的功率控制	(192)

5.7	频谱移动性管理	(196)
5.7.1	频谱移动性的特点	(196)
5.7.2	频谱切换机制	(197)
5.7.3	频谱移动性管理协议	(202)
5.7.4	频谱移动性管理面临的挑战	(202)
5.8	资源调度	(203)
5.8.1	认知无线电网络中调度的特点	(203)
5.8.2	链路级调度	(203)
5.8.3	端到端流的跨层调度	(210)
	参考文献	(212)
第 6 章	路由技术及传输层协议	(218)
6.1	路由技术	(218)
6.1.1	概述	(218)
6.1.2	路由协议	(219)
6.1.3	路由算法	(222)
6.2	传输层协议	(227)
6.2.1	传输层协议概述	(227)
6.2.2	传统无线网络的传输层协议	(228)
6.2.3	认知无线电网络的传输层协议	(229)
	参考文献	(230)
第 7 章	跨层设计及优化	(232)
7.1	传统分层设计到跨层设计的演进	(232)
7.2	认知无线电网络的跨层设计	(233)
7.2.1	频谱检测的跨层设计	(233)
7.2.2	频谱管理的跨层设计	(234)
7.2.3	频谱分配的跨层设计	(235)
7.2.4	频谱切换的跨层设计	(238)
7.3	认知无线电网络的跨层优化	(238)
7.3.1	基于模糊逻辑的跨层优化	(239)
7.3.2	基于神经网络的跨层优化	(240)
7.3.3	基于多目标优化的跨层优化	(243)
7.4	认知引擎与跨层设计及优化	(244)
7.4.1	认知引擎的功能和结构	(245)
7.4.2	基于认知引擎的跨层设计及优化架构	(245)
7.4.3	基于认知引擎的跨层设计及优化架构的优势	(246)
7.5	认知无线网络跨层设计和优化面临的挑战	(246)
	参考文献	(248)

第 8 章 认知无线电网安全	(250)
8.1 认知无线网络面临的安全问题	(250)
8.1.1 传统无线网络的安全威胁	(250)
8.1.2 认知无线网络的安全需求	(252)
8.1.3 认知无线电技术引入的安全隐患	(253)
8.1.4 认知无线网络的安全威胁及其防御机制	(255)
8.2 认知无线电网的入侵检测系统	(267)
8.2.1 入侵检测概述	(267)
8.2.2 网络安全的 P ² DR 模型与入侵检测	(268)
8.2.3 入侵检测系统的典型架构与分类	(269)
8.2.4 认知无线电网的 IDS——动态综合的安全方案模型	(271)
8.3 典型认知无线电网的安全研究	(275)
8.3.1 IEEE 802.22 WRAN 网络的安全	(275)
8.3.2 其他认知无线电网存在的安全问题	(278)
8.4 未来的研究方向	(279)
8.4.1 建立动态的无线电环境图	(280)
8.4.2 建立信誉系统	(282)
8.4.3 其他研究方向	(283)
参考文献	(285)
第 9 章 典型的认知无线电网	(287)
9.1 WRAN 网络	(287)
9.1.1 WRAN 简介	(287)
9.1.2 IEEE 802.22 标准概况	(289)
9.1.3 IEEE 802.22 空中接口	(289)
9.1.4 IEEE 802.22 的共存	(307)
9.2 XG 网络	(313)
9.2.1 XG 网络的组成结构	(313)
9.2.2 XG 网络决策	(315)
9.2.3 XG 网络实测	(316)
9.3 认知 Ad Hoc 网络	(319)
9.3.1 认知 Ad Hoc 网络与传统 Ad Hoc 网络的比较	(320)
9.3.2 认知 Ad Hoc 网络示例	(320)
9.3.3 分布式协同 MAC 机制	(321)
9.3.4 认知 Ad Hoc 网络的一些可能应用	(324)
9.4 认知 Mesh 网络	(325)
9.4.1 COMNET 网络	(326)
9.4.2 CogMesh 网络	(331)
参考文献	(337)

第 10 章 从认知无线电网络到认知网络.....	(339)
10.1 认知无线电、认知无线电网络与认知网络.....	(339)
10.2 认知网络概述.....	(340)
10.2.1 定义.....	(341)
10.2.2 简单应用实例.....	(341)
10.2.3 网络架构.....	(342)
10.2.4 体系结构.....	(345)
10.3 认知网络的典型应用——B3G 认知无线网络.....	(348)
10.3.1 认知无线接入网的管理功能.....	(349)
10.3.2 认知接入点的管理功能.....	(350)
10.3.3 认知无线终端的管理功能.....	(351)
10.4 认知网络发展面临的问题和挑战.....	(352)
参考文献.....	(353)
缩略语.....	(354)

第1章 概 论

无线频谱资源的紧缺是限制无线移动通信与服务应用持续发展的瓶颈，作为一种智能的革命性频谱共享技术，认知无线电（Cognitive Radio, CR）被称为未来最热门的无线技术。它通过对授权频谱进行“二次利用”，为缓解频谱资源缺乏与日益增长的无线业务需求之间的矛盾开辟了一条新的途径，对有效解决有限的无线资源条件下提高频谱资源利用率这一通信难题有着优越的和不可替代的意义。

本章从目前广泛关注的频谱资源紧缺现状入手，分析现有的高效频谱利用技术及典型的频谱共享技术，阐述认知无线电产生的背景和研究现状，引出认知无线网络（Cognitive Radio Networks, CRN）。

1.1 无线通信与频谱资源

从广播电视、收音机到移动电话，从射频识别（Radio Frequency Identification, RFID）到遥控器、雷达等，无线电应用在我们的身边无处不在。随着全球社会经济的不断发展，各种无线电技术在社会的各行各业中得到了日益广泛的应用。

目前，国际电信联盟（International Telecommunication Union, ITU）《无线电规则》定义的各种业务同样在我国均得到了广泛的应用，我国已成为全球当之无愧的无线电技术应用大国。我国是广播电视应用大国，目前国内电视机、收音机的拥有量分别超过了4亿台和5亿台，CCTV-9、CCTV-4两套节目已覆盖全球；我国移动电话用户数量目前已超过6.8亿，是全球移动电话用户数量最多的国家，拥有世界第一大移动通信网；中国还是为数不多的能够制造卫星和飞船的国家之一，我国拥有通信卫星、广播卫星、气象卫星和大气资源勘测卫星等多种在轨卫星，而且成功发射了“神五”、“神六”、“神七”飞船；这些高科技卫星和飞船的研制、发射和运行都以无线电技术为重要基础；我国拥有世界上优秀的气象预报系统和气象卫星，每天施放的数以千计的探空气球上都通过无线电技术获得和传送气象数据；此外，近年来，无线电技术在公安、航空、渔业、交通等领域都得到了应用，发挥了越来越显著的作用。

但随着无线电通信的飞速发展，频率资源紧张的状况也日渐突出。与矿藏、森林、水等资源一样，无线电频率也是一种宝贵的资源，而且是不可再生的。按照ITU无线电规则频率划分，目前各种无线业务可以使用的无线电频率范围为9 kHz~275 GHz。但受电波传播特性、无线通信技术以及无线电设备软硬件实现的限制，绝大多数无线电设备只能工作在50 GHz以下。随着未来无线通信的宽带化发展趋势，3G（3rd Generation）、WiMAX（Worldwide Interoperability for Microwave Access）、UWB（Ultra-Wide Band）等新技术、新业务不断涌现，频谱需求将呈指数迅猛增长。但目前很多国家差不多已将本国的可用频谱资源分配完毕，我国也不例外。由于采用了传统的静态频谱使用政策，为特定的无线业务划分了固定的频谱范围，所以留给新的系统、业务和技术的频谱非常少或者没有频谱可分配，频谱资源的供需矛

盾更为严重。

鉴于此，各国频谱管理机构都在积极研讨如何有效利用频谱的问题。近期的研究表明，在传统的“条块分割”的静态频谱使用政策下，频谱资源的利用具有高度的不均衡性^[1]。一方面，一些非授权频段由于业务繁忙占用拥挤；另一方面，一些全球授权频段，尤其是信号传播特性比较好的低频段的频谱利用率极低。来自美国国家无线网络研究实验床（National Radio Network Research Testbed, NRNRT）项目的测量报告表明 3 GHz 以下频段的平均频谱利用率仅有 5.2%^[2]，频谱资源存在巨大的“浪费”。

如何在有限的无线资源条件下提高频谱利用率，以缓解日益增长的无线业务需求和有限的频谱资源之间的矛盾，已成为通信领域研究的热点问题。

1.2 高效频谱利用技术

面对目前频谱资源紧缺现状，首先需要重新认识频谱。国际上新观点认为，频谱是一种抽象的资源，对其利用效率的高低取决于所采用的技术，需要详细探讨能充分利用频谱资源的高效频谱利用技术^[3,4]。令人欣慰的是，近年来新技术的迅猛发展为频谱高效利用提供了可能。这里从不同角度和方面总结了目前提高频谱利用率的技术，如图 1-1 所示。

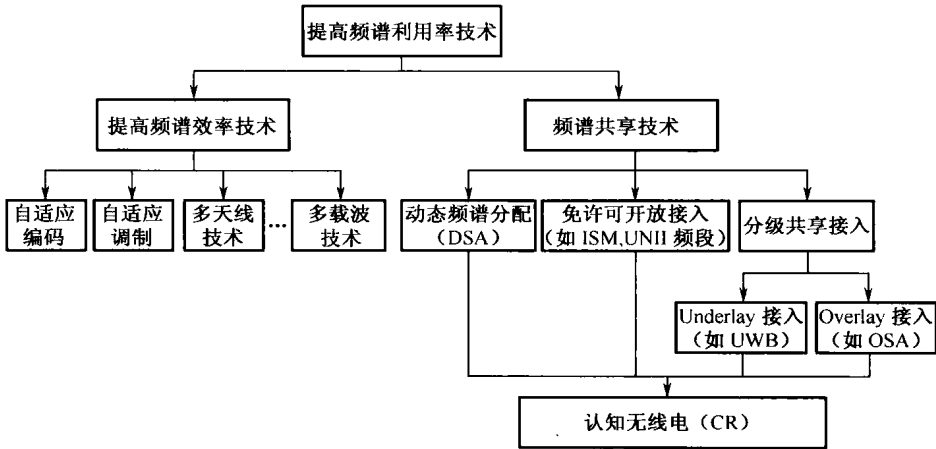


图1-1 提高频谱利用率的技术

在目前固定分配方式的频谱管理政策下，提高频谱利用率传统的方法是采用先进的通信理论与技术以提高频谱效率。现有提高频谱效率的措施很多，但可归纳为提高信源编码效率、提高信道编码效率、提高调制解调频谱效率等，相应地所采用的技术有自适应编码与调制、多天线技术、多载波技术等。目前码分多址（Code Division Multiple Access, CDMA）空中接口技术，如高速下行分组接入（High Speed Downlink Package Access, HSDPA）可以达到 1 b/s/Hz 的频谱效率，正交频分复用（Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM）和多输入多输出（Multiple Input Multiple Output, MIMO）技术的应用也只能达到 3~4 b/s/Hz 的频谱效率。3~4 倍频谱效率的提高对于人们成百上千倍的带宽需求增长仍然是微不足道的。因此在传统的固定频谱分配策略下采用的各种提高频谱效率的方法作用十分有限。由于频谱效率的提高受限于香农信道容量理论极限值，这些技术在一定程度上缓解了频谱需求矛盾，但并没有从根本上解决可用频谱资源日益紧张的局面，新业务要获得可用频谱越来越难。

近几年人们开始关注灵活的频谱共享技术^[4~6],通过频谱之间的灵活高效共享实现频谱资源的最大利用。现有的频谱共享技术,如工业、科学和医用频段(Industrial Scientific and Medical Band, ISM Band)开放接入、工作于3~10 GHz频段的超宽带UWB系统与传统窄带系统共存等技术通常应用于特定频段的共享,或受限于发送功率的短距离通信。这些技术在提高频谱利用率的同时增加了干扰,限制了通信系统的容量和灵活性。CR^[7~10]是一种更智能的频谱共享技术,它能够依靠人工智能的支持,感知无线通信环境,根据一定的学习和决策算法,实时自适应地改变系统工作参数(如传输功率、载频、调制方式等),理论上允许在时间、频率以及空间上进行多维的频谱复用,从而大大降低频谱和带宽的限制对无线技术发展的束缚,因此这一技术被预言为未来最热门的无线技术之一。但实现灵活的频谱共享在有效解决无线频谱资源紧缺问题的同时也面临更多的挑战。频谱共享意味着打破了当前频谱资源的用户专有制,减弱了对授权通信的严格保护。采用不同的频谱共享技术实现多无线电和谐共存还存在相应的难题需要攻克。

1.3 频谱共享技术

频谱共享技术的显著优势吸引了各界人士的关注,包括学术界、工程界、经济学领域、政策机构等,相应产生了一些相关概念和术语,目前叫法不一,容易混淆,尤其一些英文文献里频繁出现的一些术语,如Dynamic Spectrum Allocation、Open Spectrum Sharing、Spectrum Commons、Opportunistic Spectrum Access、Spectrum Pooling、Spectrum Underlay、Spectrum Overlay等。下面针对这些术语分别进行介绍并归类,进一步澄清这些基本概念。

1.3.1 动态频谱分配

动态频谱分配(Dynamic Spectrum Allocation, DSA)^[5,11]最早是在欧洲DRiVE(Dedicated Road Infrastructure for Vehicle Safety in Europe)/OverDRiVE计划中提出来的,其主要目标是通过充分利用不同通信业务在时间和空间上的流量统计特性,例如,分配给UMTS(Universal Mobile Telecommunications System)和DVB-T(Digital Video Broadcasting-Terrestrial)的频谱量随着地区和时间不同而变化,实现无线业务的共存,从而提高频谱利用率。动态频谱分配策略根据无线电系统的实际通信量,动态地分配频谱资源。因此用户在特定时间和空间下使用的频段不是事先固定的,而是临时分配并且是变动的。

DSA要求预测各无线电系统的通信量以根据实际的负载动态分配频段,这就需要改变现有的频谱分配总体结构,在频谱管理、网络结构、通信终端等方面改动较大。DSA策略在一定时间、一定区域把无线频谱的某一部分分配给某一无线电系统,其他用户不得使用,因此并不能完全消除由于业务量的突发性而产生的频谱空穴。

1.3.2 免许可开放接入

免许可开放接入(Spectrum Commons/Open Spectrum Sharing)是迈向真正意义上频谱共享的第一步。一般来说,无论组织或个人,希望使用某一频段进行无线通信,都必须向当地政府申请许可证(License)并交纳一定的管理费用。但也有一些频段是例外的,如ISM频段、

免授权国家信息基础 (Unlicensed National Information Infrastructure, UNII) 频段等。工作于这些频段的用户无需许可证, 也没有主次之分, 只需要遵守一定的发射功率 (一般低于 1 W), 并且不对其他频段造成干扰即可。

在所有频谱共享技术中, 目前免许可开放接入在实际使用中最为成功。这主要是由于它实现简单, 特别是干扰控制简单, 并且无需频谱环境感知。但这种共享方式限制共享用户只能发射较小功率, 对其他用户的干扰完全控制在许可范围内, 使得其应用范围较窄, 只适合短距离通信, 目前的典型应用是无线局域网、蓝牙、ZigBee 等。此外, 这种方式的频谱共享仅限于可数的几个频段, 并没有实现真正的全频段共享。

1.3.3 分级共享接入

分级共享接入技术是指在不改变现有频谱分配总体结构 (即频谱分配表中指配给各通信系统频段基本不变) 的前提下, 通过开放授权频段实现不同无线电系统用户间的频谱共享, 以提高频谱利用率^[6]。这种共享方式的具有不同的等级, 即严格的主从关系, 提供共享频谱资源的用户称为主用户 (Primary User), 共享主用户频谱资源的用户称为次用户 (Secondary User)。次用户只有在不干扰主用户正常工作的前提下才能进行通信。

根据主用户和次用户在时间和频率上使用频谱的不同, 分级共享接入方式分为覆盖式频谱共享 (Spectrum Underlay) 和机会式频谱共享 (Spectrum Overlay) 两类。在覆盖式频谱共享方式中, 一个无线电系统同时与另一个无线电系统使用相同的频谱, 在频率上完全覆盖。为了避免对主用户的干扰, 次用户通常采用扩频等技术限制自身的发射功率足够小。目前 UWB 系统与传统窄带系统共存就是采用这种方式。这种共享方式由于主从用户间没有任何协作, 无法控制用户间的干扰, 次用户可能对主用户造成较大干扰, 因此很多无线电系统无法采用这种简单的频谱共享方式。对于机会式频谱共享方式, 其核心思想是次用户采用“见缝插针”的方式使用主用户的频谱资源。所谓见缝插针是指主用户一旦有空闲信道, 次用户便接入; 主用户没有空闲信道, 次用户便等待主用户空闲信道的出现。一旦主用户要使用自己被次用户正占用的信道, 次用户必须立即释放给主用户。实现机会式频谱共享要求无线电具备感知能力, 通过感知无线电的外部环境, 包括检测电磁场环境中其他用户的情况, 动态地改变无线电特性参数 (如功率、频率、调制、编码等), 以便有效利用空闲频谱资源, 同时避免对主用户通信系统的干扰。这就需要 CR 这一核心技术的支撑。

机会式频谱共享的思想最先在瑞典皇家技术学院的 Joseph Mitola III 博士的频谱共享池 (Spectrum Pooling)^[7]策略中提出, 后来被美国国防高级研究计划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 下一代无线通信计划 (neXt Generation, XG)^[12]所关注, 被称为机会频谱接入 (Opportunistic Spectrum Access, OSA) 技术。不同于严格限制次用户发射功率的覆盖式频谱共享方法, 机会频谱接入主要通过限制次用户共享频谱的位置和时间来实现。机会频谱接入也不同于利用不同频谱占用统计特性的 DSA, 其目标是通过向次用户开放授权频谱, 允许次用户识别和利用可用频谱, 最大限度地消除时间和空间上的频谱空穴。这种频谱共享技术实现难度较 DSA 小, 且能使得主用户和次用户取得接近于最优的频谱资源利用效率, 有望成为解决无线电频谱紧缺问题的最有效途径, 近几年工业界和学术界对此技术探讨也较为活跃。

综上所述, 各种频谱共享技术具有不同的适用范围, 各有其优缺点。OSA 技术因为具有

CR 的功能, 实现了更智能的频谱共享。事实上, CR 是个很宽泛的概念, 可泛指一切通过认知 (或感知) 功能提高系统性能的技术。因此 CR 的应用不仅限于 OSA, 完全可应用于上述各频谱共享技术中, 以进一步改善多无线电共存性能。当然目前来看 OSA 技术仍然是 CR 的一个最主要应用。

1.4 认知无线电的产生

认知无线电 (CR) 的产生与软件无线电技术密不可分。随着无线通信技术的飞速发展, 出现了多种通信体制并存和各种标准层出不穷的现象, 以硬件为主的传统的通信体制难于适应这种局面。针对多种无线通信标准和体制之间无法兼容的弊端, 1992 年 5 月, Mitola 博士首次明确提出了软件定义无线电 (Software Defined Radio, SDR) 的概念, 其目的就是希望建立开放式、标准化、模块化的通用硬件平台, 将各种功能及参数, 如工作频段、调制方式、数据格式、加密模式、通信协议等都由软件来完成。这样的系统具有很好的兼容性、可升级性和开放性。

随着技术的不断发展, 工业界已经不仅仅满足于 SDR 为商用所提供的多模式、多波段能力, 希望无线电设备能够具有自适应的智能化功能来满足市场需求, 即未来的系统应该:

- ① 有足够频率、波形自适应能力来和其他现存的调制技术共存;
- ② 有能力作为使用不同调制技术网络之间的网关;
- ③ 有充足的智能来发现可用频谱、配置系统并开始工作。

SDR 满足①和②, 因为它的工作频段和波形是由软件控制的, 更换不同的调制方式和协议只需要更换不同的代码。根据③的要求, Mitola 又提出了 CR 的思想。它是软件无线电技术向市场迈进的过程中衍生出的新思想。CR 与 SDR 的主要区别在于: SDR 的工作参数由软件控制, 允许通过编程来改变硬件平台支撑的收发机工作频率和调制方式; CR 能基于同工作环境的交互来改变电台参数, 这些交互包括主动地与频谱使用者协商和通信, 或被动地频谱检测判决。目前, 人们对 CR 和 SDR 的关系基本达成共识: SDR 具有相当大的灵活性, 但与 CR 相比, 缺乏一定的智能。CR 的实现不一定需要 SDR 的支撑, 但如果借助于 SDR, 则 CR 会具有更多的潜在优势。

虽然 CR 最初的提出主要源于软件无线电技术的扩展, 但是该技术的问世却推进了频谱共享技术的发展。目前相关研究表明大量授权频谱未得到充分利用, 图 1-2 为使用 20 kHz 分辨率、30° 角的天线, 于中午时分在美国加州伯克利市市区现场实地测量的功率谱密度分布图。

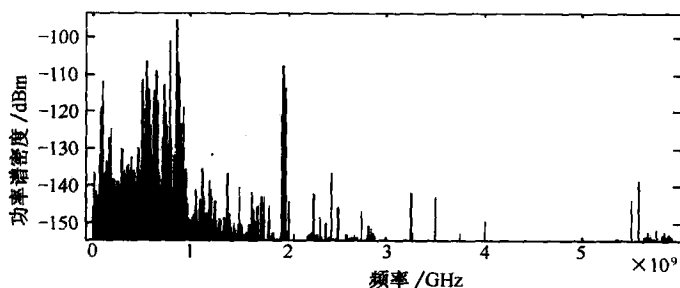


图1-2 0~6 GHz的功率谱密度分布图