

认知无线电频谱检测 理论与实践

温志刚 编 著

RENZHI WUXIANDIAN
PINPU JIANCE
LILUN YU SHIJIAN



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

认知无线电频谱检测理论与实践

温志刚 编 著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

无线通信的发展导致无线频谱资源稀缺。近年来提出的认知无线电技术有望解决这一问题。频谱检测是认知无线电的关键技术之一。本书主要阐述了认知无线电频谱检测的理论和实践,首先介绍传统的频谱检测方法,其次对协作频谱检测进行详细阐述,最后对宽带频谱检测方法的最新研究进展进行了概述。此外,书中还介绍了认知无线电相关标准进展。对认知无线电频谱检测理论进行阐述之后,使用了大量篇幅对认知无线电的仿真和试验平台搭建进行了描述,并提供实例进行讲解。本书是一本专门介绍认知无线电频谱检测的技术书籍,可以作为通信与信息类和电子科学技术类专业高年级本科生及相关专业研究生的参考书,也可供从事无线通信领域研发工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

认知无线电频谱检测理论与实践/温志刚编著. --北京:北京邮电大学出版社,2011.9

ISBN 978-7-5635-2744-1

I. ①认… II. ①温… III. ①无线电通信—频谱—检测 IV. ①TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 188781 号

书 名: 认知无线电频谱检测理论与实践

作 者: 温志刚

责任编辑: 何芯逸

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京源海印刷有限责任公司

开 本: 787 mm×960 mm 1/16

印 张: 11.25

字 数: 220 千字

版 次: 2011 年 9 月第 1 版 2011 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-2744-1

定价: 22.00 元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社营销中心联系 •

前 言

近年来,无线通信技术取得巨大发展,如 LTE、LTE Advanced、WiFi、WiMax、无线 Mesh 网、卫星通信、协同通信等。这些通信系统对无线频谱资源的需求也相应增长,从而导致适用于无线通信的频谱资源变得日益紧张,成为制约无线通信发展的新瓶颈。近年来提出的认知无线电(又称感知无线电)(Cognitive Radio)技术有望解决这一问题。

认知无线电这一概念由 Joseph Mitola III 博士在 1999 年提出后经过了十多年的发展。理论研究取得了许多成果,主要包括:频谱检测、认知引擎、动态频谱管理、认知导频信道、端到端重配置等。其中频谱检测是认知无线电中的重要问题之一。

与此同时,国际标准化组织,如美国电气电子工程师学会(IEEE)、欧洲电信标准化协会(ETSI)、欧洲计算机制造商协会(ECMA)、软件无线电论坛、国际电信联盟 ITU-R WPs 1B 和 5A 都正在制定有关认知无线电的定义和测量方面的标准。

然而,认知无线电系统的硬件设计和开发相对滞后,前期的理论研究大多都使用仿真软件展开。随着认知无线电的深入应用和电子器件的发展,基于现场可编程门阵列(Field-programmable Gate Array ,FPGA)的认知无线电平台引起关注,如 Iris 的 FPGA 平台、美国加州大学伯克利分校开发的 BEE2 平台、莱斯大学的 WARP、KUAR 平台以及 Lyrtech 的商业平台均使用了 FPGA 作为核心处理模块。

本书主要讲述了认知无线电频谱检测理论和实践,全书共分 8 章,第 1 章介绍认知无线电发展历史、基本概念和网络结构;第 2 章全面总结了认知无线电标准化进展,主要包括 IEEE 802.22、IEEE SCC41、ITU-R WP、ETSI TC RRS 以及 ECMA 等相关标准;第 3 章介绍了无线电通信相关技术,包括无线衰落信道、多天线技术、多载波调制技术、协同通信技术和软件无线电技术;第 4 章介绍了认知无线电中的频谱检测技术,主要包括能量检测、循环特征检测、匹配滤波器检测以及其他一些检测方法;第 5 章重点介绍了认知无线电中的协作频谱检测方法,主要包括协作频谱检测框架、频谱感知模型、频谱检测中的假设检验、控制信道、数据融合、用户选择、知识库以及协作增益和开销等;第 6 章介绍

了认知无线电中的宽带频谱检测方法,主要包括多频带协作频谱感知、压缩传感理论、基于压缩传感的宽带频谱检测等;第7章主要介绍了认知无线电仿真平台,包括 Matlab 认知无线电仿真平台和 NS-2 认知无线电仿真平台;第8章主要介绍了认知无线电实验平台,包括可重配置硬件平台、认知无线电实验平台现状、USRP 硬件平台结构、GNU Radio 开发实践。

本书取材广泛,理论联系实际,讲解深入浅出,可以作为通信与信息类和电子科学与技术类专业高年级本科生及相关专业研究生的参考书,也可供从事无线通信领域研发工作的工程技术人员参考。

在本书的撰写过程中,作者得到了所在研究室的教师和部分研究生的许多支持和帮助,在此表示深深的谢意。

由于作者水平和时间所限,难免有错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

作 者

目 录

第 1 章 认知无线电概述	1
1.1 认知无线电原理	3
1.1.1 CR 中的认知圈	3
1.1.2 CR 的收发机结构	4
1.1.3 干扰温度	6
1.2 认知无线网络结构	7
1.2.1 xG 网络结构	7
1.2.2 xG 网络实例	10
1.3 认知无线电的应用	12
参考文献	14
第 2 章 认知无线电标准进展	16
2.1 IEEE 802.22 标准	16
2.1.1 概述	16
2.1.2 物理层研究进展	20
2.1.3 MAC 层研究进展	21
2.1.4 频谱管理	24
2.2 IEEE SCC41	25
2.3 ITU-R WP	25
2.4 ETSI TC RRS	25
2.5 ECMA	26
参考文献	26

第 3 章 无线通信相关技术	28
3.1 无线衰落信道概述	28
3.1.1 自由空间路径损耗	29
3.1.2 小尺度衰落	29
3.2 多天线技术	31
3.3 多载波调制技术	34
3.4 协同通信技术	36
3.4.1 传统中继信道	36
3.4.2 协同通信协作方式	37
3.5 软件无线电技术	41
3.5.1 软件无线电技术概述	41
3.5.2 数字下变频器	43
参考文献	44
第 4 章 认知无线电中的频谱检测方法	48
4.1 主用户信号频谱检测方法	49
4.2 能量检测方法	50
4.3 循环特征检测	52
4.4 匹配滤波器检测	53
4.5 多载波 CR 系统中的最大比合并频谱检测	53
4.6 其他的频谱检测方法	57
参考文献	58
第 5 章 认知无线电中的协作频谱检测方法	61
5.1 协作频谱检测方法	61
5.2 协作频谱感知架构	64
5.3 协作频谱感知模型	66
5.4 协作频谱检测假设检验	70
5.5 协作频谱检测控制信道	72
5.6 协作频谱检测数据融合	73

5.7 协作频谱检测用户选择	75
5.8 协作频谱检测知识库	77
5.9 协作频谱检测增益和开销	78
参考文献	84
第 6 章 认知无线电中的宽带频谱检测方法	90
6.1 多频带协同感知频谱检测方法	90
6.2 宽带协同感知频谱检测方法	91
6.3 压缩传感理论	92
6.4 基于压缩传感的宽带频谱检测	94
参考文献	96
第 7 章 认知无线电仿真平台	98
7.1 Matlab 认知无线电频谱检测仿真平台	98
7.2 NS-2 认知无线电仿真平台	101
第 8 章 认知无线电实验平台	112
8.1 可重配置软硬件平台简介	112
8.2 认知无线电实验平台现状	114
8.3 USRP 硬件结构	114
8.4 GNU Radio 开发实践	123
8.5 认知无线电实验平台 FPGA 设计与实践	132
参考文献	149
附录 1 Matlab 仿真程序	151
附录 2 NS-2 仿真程序	154
附录 3 能量检测 FPGA 实现代码	163

第 1 章 认知无线电概述

近十年,无线通信技术取得巨大发展,如 WiFi、WiMax、无线 Mesh 网、卫星通信、协同通信和认知无线电等。如图 1-1 所示,这些技术共存在一个多频段(Multi-Radio,MR)多信道(Multi-Channel,MC)网络环境中为用户服务。这些通信系统对无线频谱资源的需求也相应增长,从而导致适用于无线通信的频谱资源变得日益紧张,成为制约无线通信发展的新瓶颈。针对目前的频谱固定分配方式,在可用范围内可供分配使用的频率已寥寥无几。其次,这些已被分配频谱的使用效率(Spectrum Utilization Ratio)并不高,仅为 15%~85%。因此,如何提高频谱使用效率现已成为热点研究课题。

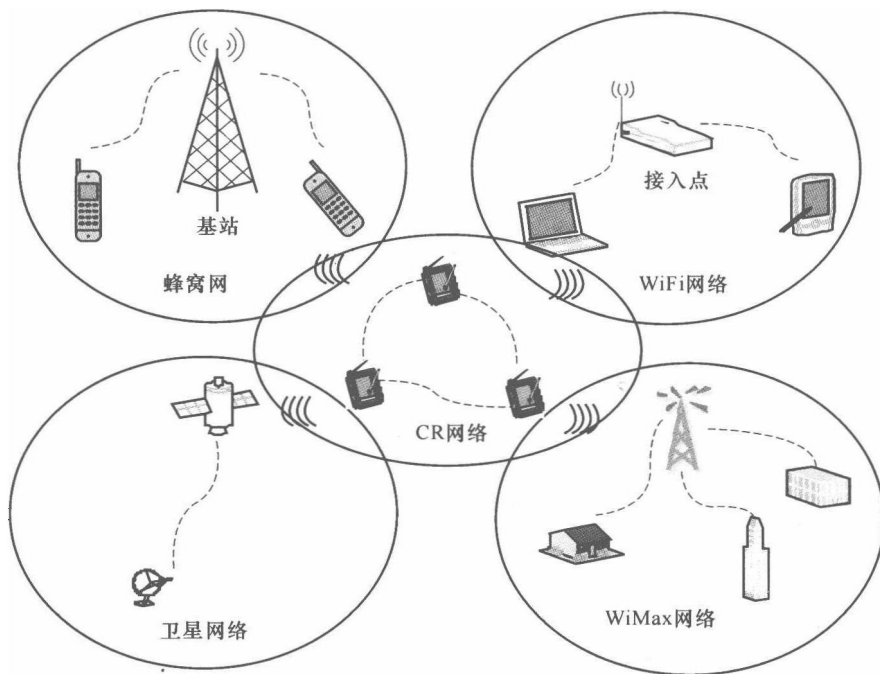


图 1-1 认知无线网络

近年来提出的认知无线电(又称感知无线电)(Cognitive Radio, CR)技术有望解决这一问题。认知无线电这一概念首先由 Joseph Mitola 博士在 1999 年提出。后来 FCC 提出一种被广泛接受的定义:CR 是一种智能无线电系统,它能感知周围环境,运用“理解—构建”的方法从周围环境中获取信息,并通过实时改变传输功率、载频、调制方式等传输参数来适应环境的变化。CR 的两个最主要目标是高度可靠的通信方式以及高效的频谱利用效率。从定义中可以看出,认知无线电应当具备的两大主要特征是认知能力(Cognitive Capability)和重新配置能力(Reconfigurability)。认知能力能够使认知无线电与周围环境进行交互活动,进而决定适合的通信参数来适应环境的无线频谱资源;重新配置能力能够不改变任何硬件部分而调整传输功率、载频、调制等发射参数。从认知方面来看,认知无线电看起来像信号处理和机器学习过程;从重新配置方面来看,认知无线电看起来像软件无线电在执行通过认知能力获得的任务。

CR 的最终目标是通过认知和重新配置获得最好的可用频谱。由于多数频谱已经被分配掉了,因此最大的挑战就是如何与授权用户共享频谱而不对其产生干扰。图 1-2 描述了认知无线电是如何利用暂时没被使用的频谱,通常称其为频谱空洞(spectrum hole)或空白段(white space)。如果这一频段随后被授权用户使用了,那么认知无线电或转移到另外一个频谱孔,或继续使用该频段,但是要改变它的传输功率与调制方法以避免对授权用户产生干扰,这样就可以实现动态频谱接入(Dynamic Spectrum Access)。

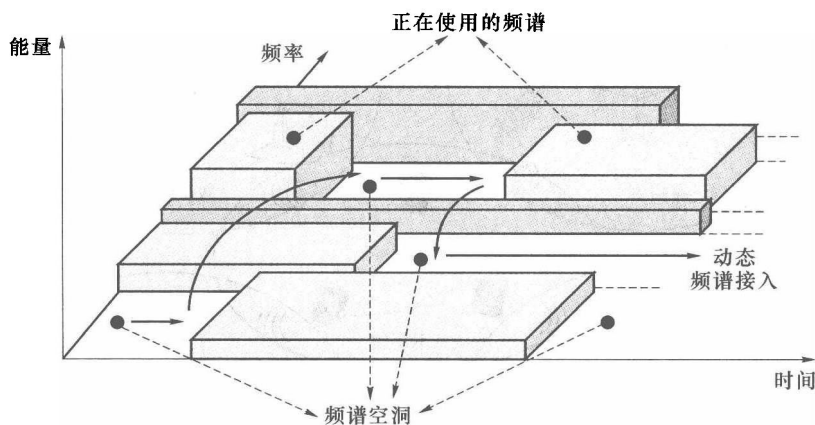


图 1-2 频谱孔

CR 技术对现存的无线频谱固定分配制度提出了挑战,对此,一些频谱管理部门如 FCC 和英国通信办公室(Ofcom)等给予了积极的支持。2002 年 12 月, FCC 指出非授权设备应具备能够识别未占用频段的能力;2003 年 11 月, FCC 推荐了一种新的量化和管理干扰源的模

型,即干扰温度(Interference Temperature, IT),以扩展移动和卫星频段的非授权操作;同年12月FCC成立了CR工作组,明确表示支持CR并修正美国的法律;2004年5月,FCC又建议非授权无线电可在电视广播频段内操作。

在频谱政策管理部门的带动下,一些标准化组织接纳了CR并先后制定了一系列标准以推动该技术的发展。2004年9月23日,IEEE SA标准委员会批准了IEEE 802.22的项目授权请求。请求中指出,802.22无线区域网工作组的任务是为没有VHF/UHF频谱使用许可的设备指定基于认知无线电的物理层和媒体接入控制(Media Access Control, MAC)层的空中接口(Air Interface)标准,以使这些设备能够工作于VHF/UHF频带而不对电视广播业务产生干扰。IEEE 802.22是把认知无线电技术由概念变成现实的首个标准,它对认知无线电技术的演进和发展具有重要意义;IEEE 802.16工作组正在着手制定h版本标准,致力于改进如策略、MAC增强等机制以确保基于WiMax的免授权系统之间以及与授权系统之间的共存;此外,国际电信联盟(ITU)也在努力寻找类似CR的频谱共享技术。

除此之外,CR也引起了众多学者的广泛关注。例如,德国卡尔斯鲁厄大学的F. K. Jon-dral教授等提出的频谱池系统、美国加利福尼亚大学伯克利分校R. W. Brodersen教授的研究组开发的COVUS系统、美国佐治亚理工学院宽带和无线网络实验室I. F. Akyildiz教授等人提出的OCRA项目、美国军方DARPA的XG项目、欧盟的E2R项目等。基于这些项目的推动,在基本理论、频谱感知、数据传输、网络架构和协议、与现有无线通信系统的融合以及原型开发等领域取得了一些成果。IEEE为此专门组织了两个重要的国际年会IEEE CrownCom和IEEE DySPAN来交流这方面的成果,许多重要的国际学术期刊也发表了关于CR的专辑。

1.1 认知无线电原理

1.1.1 CR中的认知圈

CR技术源于软件无线电技术,立足于对已分配频谱资源的再次利用。其基本思路是:感知用户或次用户(Rental User或Second User, RU或SU)持续检测已授权频谱资源,并在保证授权用户或主用户(Licensed User或Primary User, LU或PU)优先使用,且在其传输性能几乎不受损的情况下,自适应地调整收发设备到当前检测到的空闲频谱上进行通信。

CR技术基于频谱检测,是对已分配频谱资源的再次使用,已受到学者们广泛关注并取得许多研究成果。Mitola的认知无线电给出了一个主要在应用层,以感知通信环境(RF en-

vironment)为基础,做出计划(plan)和决策(decide),称为一个认知圈(Cognitive Computer Cycle),如图 1-3 所示。该图描述了认知无线电如何与环境(outside world)进行信息交互,即外界刺激和变化进入认知圈,最终得到这样一个认知无线电持续的观察环境(observe)、自身定位(orient)、制订计划(plan)、学习(learn)、判决(decide)并执行(act)的流程。在 Mitola 的认知无线电中,在作出改变运行参数的决定的时候,无线节点和网络观察到的每一个可能的参数都被考虑到,所以 Mitola 描述的认知无线电通常被称为全认知无线电。

然而,当今的无线网络采用的是固定频谱分配政策,即:无线频谱资源的规划和使用由政府部门制定,收发机对频谱的使用需要得到政府部门的许可。因此人们开始考虑允许 RU 在对 LU 的通信质量不影响的情况下使用已分配的许可频段。这种 CR 系统是目前人们的主要研究对象。

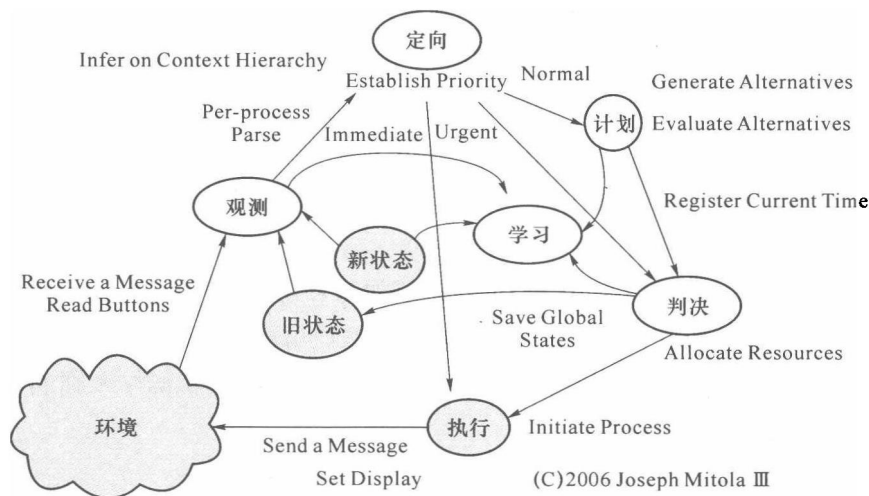


图 1-3 Mitola 的认知圈

1.1.2 CR 的收发机结构

CR 技术的最终目标是通过认知和重配置获得频谱资源。因此,CR 技术最大的挑战就是如何感知频谱空洞。所谓频谱空洞是指,已分配给主用户但当前并未被使用,故可供感知用户使用的频段。频谱空洞感知主要靠 CR 前段来实现,如图 1-4 所示。其主要部分是射频前端(RF Front-End)和基带处理单元(baseband processing),每部分都可以重新配置参数以适应实时改变的射频环境。

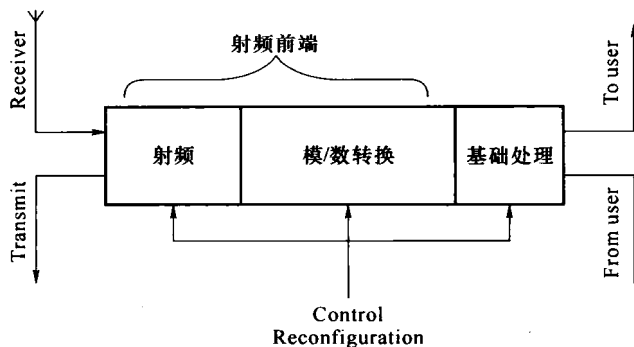


图 1-4 CR 的收发机物理结构

CR 的收发机结构的前端部分具有宽带感知能力。这种功能是通过宽带天线、功率放大器、自适应滤波器等射频硬件技术来实现的。结构如图 1-5 所示。

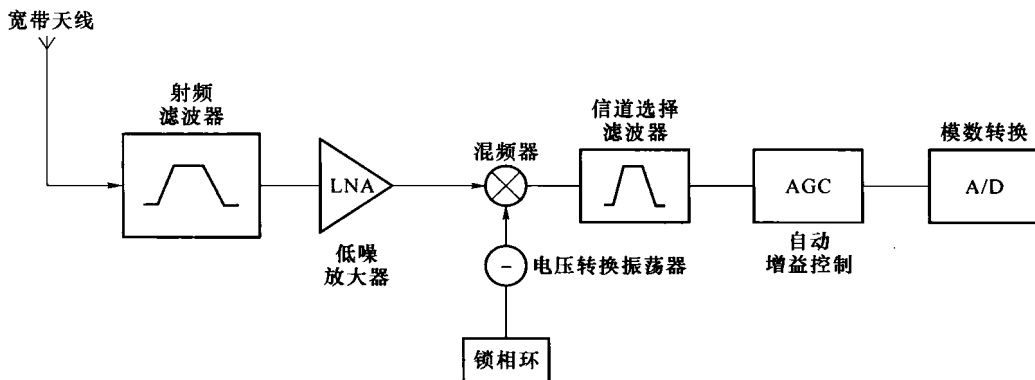


图 1-5 CR 的收发机的射频前端结构

- 射频滤波器(RF Filter): 射频滤波器通过对接收到的射频信号进行带通滤波来选择所需的频带。
- 低噪放大器(Low Noise Amplifier, LNA): 低噪放大器放大信号同时降低噪声。
- 混频器(Mixer): 将接收到的信号与本地产生的射频进行混频并转换成中频或基带频率。
- 电压转换振荡器(Voltage-Controlled Oscillator, VCO): 产生一个具有给定电压的特定频率的信号与接收信号进行混合。
- 锁相环(Phase Locked Loop, PLL): 确保信号能锁在某一特定频率。
- 信道选择滤波器(Channel Selection Filter): 用来选择需要的信道并拒绝相邻信道。

- 自动增益控制(Automatic Gain Control, AGC):自动增益控制在输入信号范围内稳定放大器的输出功率。

在这个结构中,射频前端接收宽带信号、高速数/模转换器对其进行抽样,同时也对同频段授权用户进行度量。因此,实现 CR 的收发机最大的挑战是从大范围内的频谱中检测出授权用户的微弱信号。CR 的收发机的这种能力称为频谱感知。

1.1.3 干扰温度

干扰温度(IT)是 CR 中另一个重要概念。接收天线的 IT 提供了在某一地理位置上的某一被检测的频段上接收机能够顺利工作的最差环境的特征描述,也就是可接受的射频干扰的准确测度。在这个频带内,任何使噪声基底上升并超出干扰温度界线的发射都被视为有害信号。IT 模型揭示了认知无线电的发射端设计在它的射频信号被 LU 接收机接收到的时候要接近噪声的水准。由于这些额外噪声的出现,噪声基底在服务范围内的不同的点上有所增加,在图 1-6 中用原始噪声基底(original noise floor)上的不同尖峰来表示。IT 的单位可以由接收机噪声温度的概念来定义。可以用热力学温度来度量干扰噪声。IT 的最大值 $T_{\max}$ 与玻耳兹曼常数(Boltzmann's constant) $k=1.3807 \times 10^{-23}$ J/K 就可以产生相应的某一频带上的可容许功率谱密度的上限,它的单位是 J/s,或者是等价单位 W/Hz。干扰温度 $T_1(f_c, B)$ 定义如下:

$$T_1(f_c, B) = \frac{P_1(f_c, B)}{kB} \quad (1-1)$$

其中 f_c 是中心频率, B 是占用带宽。

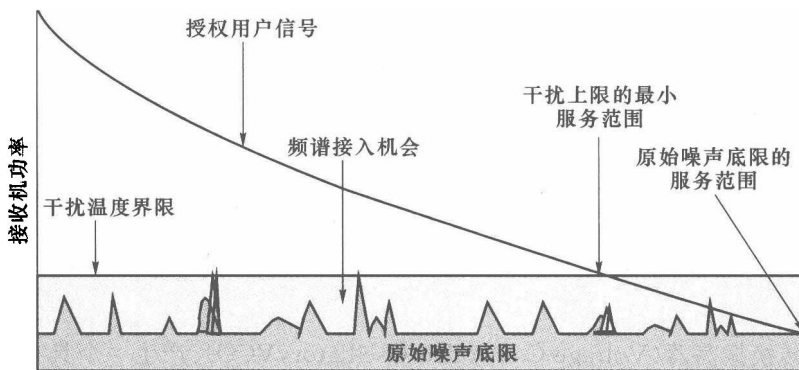


图 1-6 干扰温度模型

1.2 认知无线网络结构

认知无线电的网络结构具有自身的特点。基于认知无线电的多系统共存、动态频谱接入、频谱检测方法各异等特点,学者们提出了一些适用于认知无线网络架构。

1.2.1 xG 网络结构

当前无线网络以不同的频谱和接入技术构成了异构网络,其中频谱分配分为授权频谱和非授权频谱。DARPA(Defense Advanced Research Projects Agency)提出一种 xG 网络架构,如图 1-7 所示。主要分为授权网络(Primary network)和 xG 网络(xG network)^[5]。

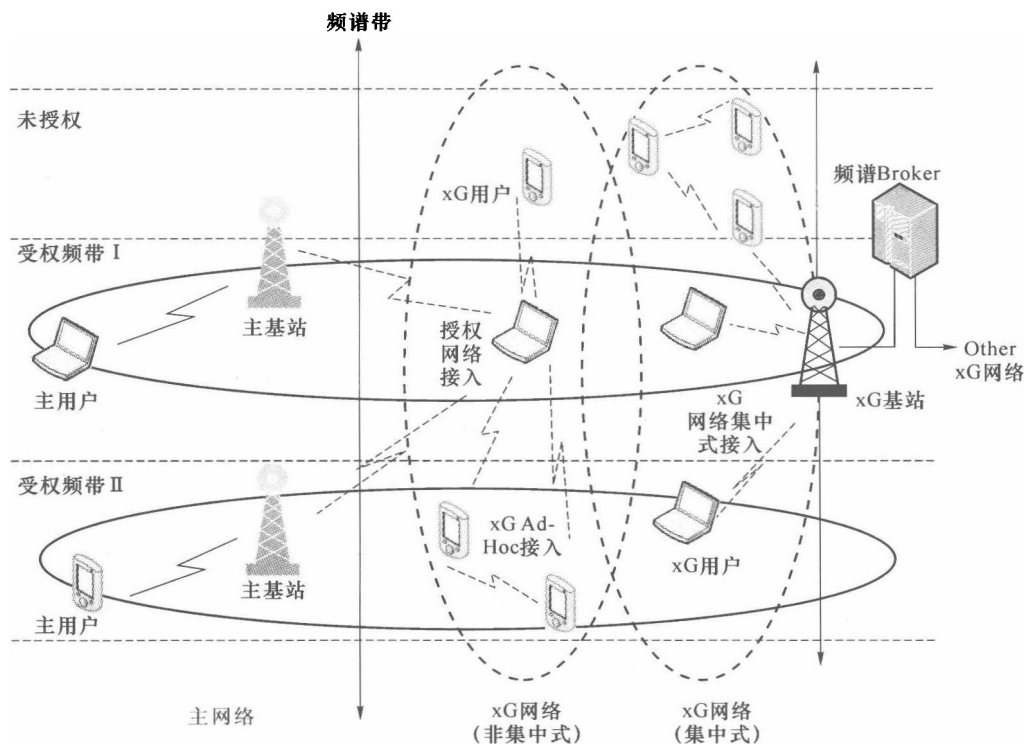


图 1-7 xG 网络结构

1. 授权网络

授权网络是现有运行在授权频段的网络,如蜂窝网、广播电视网。授权网络包括:

- 主用户(Primary User),也称为授权用户(Licensed User),被授权在特定频段操作。

通过主基站(Primary Base-station)控制接入,不会被其他授权用户影响。主用户不需要做任何更改或具有额外功能就可以与 xG 用户和 xG 基站共存。

- 主基站是具有频谱授权的固定基础设施网元(fixed infrastructure network component),如蜂窝网中的 BTS(Base-station Transceiver System)。

2. xG 网络

xG 网络,又称认知无线网络(Cognitive Radio Network),动态频谱接入网络(Dynamic Spectrum Access Network),次级网络(Secondary Network),非授权网络(Unlicensed Network)。xG 网络没有被授权的频谱可用。因此,频谱接入只有机会方式(Opportunistic Manner)。xG 网络部署方式分为集中(infrastructure)式 xG 网络和 Ad-Hoc xG 网络。xG 网络包括:

- xG 用户,又称非授权用户(Unlicensed User),认知无线电用户(Cognitive Radio User),次级用户(Secondary User)。xG 用户没有频谱授权,因此需要额外的功能共享授权频谱。
- xG 基站(xG Base-station),又称非授权基站(Unlicensed Base-station),次级基站(Secondary Base-station)。xG 基站是 xG 网络中的一个固定基础设施(Fixed Infrastructure)。提供对 xG 用户的单跳连接,通过这一连接,xG 用户可以接入到其他网络。
- 频谱 Broker,又称调度服务器(Scheduling Server)。频谱 Broker 是 xG 网络一个集中式网络实体(Central Network Entity),在不同的 xG 网络之间共享频谱方面有非常重要的作用。频谱 Broker 可以连接到每一个网络,作为频谱信息管理器,实现了多个 xG 网络的共存。

xG 网络架构如图 1-7 所示,包含不同类型的网络,授权网络、集中式 xG 网络和 Ad-Hoc xG 网络。xG 网络运行在混合的频谱环境中,包含授权频带和非授权频带。xG 用户可以通过多跳方式或接入基站的方式进行通信。因此,DARPA xG 网络架构中有三种不同的接入方式。

- xG 网络集中式接入:在授权和非授权频带,xG 用户可以通过自身的归属 xG 基站进行接入。
- xG Ad-Hoc 接入:在授权和非授权频带,xG 用户之间可以通过 Ad-Hoc 方式互相通信。
- 授权网络接入:xG 用户在授权频带接入主基站。

3. xG 网络功能

xG 网络既可以在授权频谱工作,也可以在非授权频谱工作。因此,xG 网络的功能需求依据频谱的授权和非授权不同而变化。基于此,xG 网络可分为 xG 网络在授权频带和 xG 网络在非授权频带。

- xG 网络在授权频带:如图 1-2 所示,在授权频带存在频谱空洞。因此 xG 网络可以通过认知无线电技术利用这些频谱空洞,如图 1-8 所示。xG 网络与授权网络在相同位置和频段共存。虽然 xG 网络的主要目标是提高频谱利用率,然而在授权频带工作模式下,xG 网络的首要任务是主用户的信号检测。xG 网络中的信道容量取决于 xG 用户附近主用户的干扰。因此,在这种工作模式下,如何避免对主用户的干扰是首要任务。换言之,如果主用户再现于 xG 用户占用的频段,xG 用户应立即腾空目前占用的频带,并立即切换到新的可用频谱,这一过程称为频谱切换(Spectrum Handoff)。

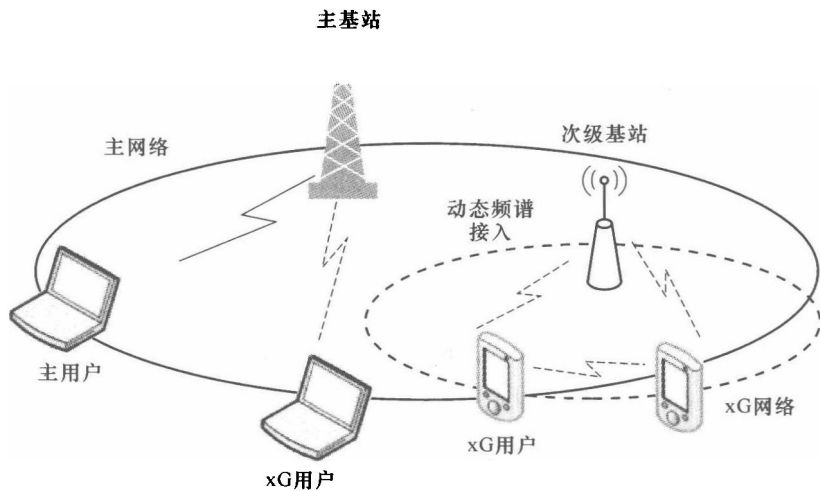


图 1-8 xG 网络授权频段频谱共享

- xG 网络在非授权频带:ISM(Industrial Scientific and Medical)频段采用开放频谱策略,由于异构网络共存,ISM 频段的频谱效率正在降低。开放频谱接入容量和业务质量取决于如何设计无线电有效分配频谱的程度。在该频段,xG 网络设计用于提高非授权频段的频谱利用率。如图 1-9 所示,所有网络实体对这一频带拥有同等的接入权。多个 xG 网络在同样的区域共存并使用相同的频段进行通信。智能的频谱共享算法能够提高频谱利用效率,支持更高的服务质量。在这一架构中,xG 用户更