

Cambridge Wireless Essentials Series

剑桥无线基础系列

CAMBRIDGE

认知无线电基础

Essentials of Cognitive Radio

[爱] 琳达·E·多伊尔 著 任品毅 张超 译

Linda E. Doyle



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

Cambridge Wireless Essentials Series
剑桥无线基础系列

Essentials of Cognitive Radio

认知无线电基础

〔爱〕 琳达·E·多伊尔 著

Linda Doyle
Trinity College, Dublin

任品毅 张 超 译



西安交通大学出版社
Xi'an Jiaotong University Press

This is a Simplified Chinese translation of the following title published by Cambridge University Press: Essentials of Cognitive Radio ISBN 9780521897709
CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS 2009

This Simplified Chinese translation for the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

©Cambridge University Press and Xian Jiaotong University Press 2012

This Simplified Chinese translation is authorized for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) only. Unauthorised export of this Simplified Chinese translation is a violation of the Copyright Act. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of Cambridge University Press and Xian Jiaotong University Press.

陕西省版权局著作权合同登记号:25-2012-122

图书在版编目(CIP)数据

认知无线电基础/(爱)多伊尔(Doyle, L. E.)著;
任品毅,张超译. —西安:西安交通大学出版社,
2012.7

(剑桥无线基础系列)

书名原文:Essentials of Cognitive Radio

ISBN 978-7-5605-4386-4

I. ①认… II. ①多… ②任… ③张…

III. ①无线电技术-基本知识 IV. ①TN014

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 108280 号

书 名	认知无线电基础
著 者	(爱)琳达·E·多伊尔
译 者	任品毅 张 超
出版发行	西安交通大学出版社 (西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)
网 址	http://www.xjtpress.com
电 话	(029)82668357 82667874(发行中心) (029)82668315 82669096(总编办)
传 真	(029)82669097
印 刷	西安建科印务有限责任公司

开 本	700 mm×1000 mm	1/16	印张	13	字数	157 千字
版次印次	2012 年 7 月第 1 版	2012 年 7 月第 1 次印刷				
印 数	0001~3000 册					
书 号	ISBN 978-7-5605-4386-4/TN·135					
定 价	38.00 元					

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82665380

读者信箱:banquan1809@126.com

版权所有 侵权必究

译者序

随着无线通信需求的不断增长,人们对于无线通信数据传输速率的要求越来越高。而现代社会中,现行的频谱管理体制为新业务和新系统预留的资源非常少,所以无线电频谱已经成为了非常宝贵的资源。另一方面,美国联邦通信委员会(FCC)大量研究表明,频谱的使用情况是动态变化的,大部分时段和空间的频谱利用率非常低。为了解决频谱利用率不均衡的问题,1999年 Joseph Mitola 博士提出了认知无线电的概念,其基本思想是非授权用户(次级用户或者认知用户)通过检测授权频段用户的使用情况,机会地接入授权频段,并且保证不影响授权用户的通信。而这种认知能力要求认知用户通过学习、理解等方式自适应地调整无线传输参数(如功率、载波调制和编码等)来适应外部无线环境,自主寻找和使用空闲频谱。因此,认知无线电技术为解决频谱资源不足、实现频谱动态管理及提高频谱利用率提供了强有力的技术支撑,其必将成为未来无线通信技术的核心关键技术。

本书回避了复杂的数学描述,力求用浅显且形象的语言对认知无线电技术的基本要素进行了介绍。首先对认知无线电技术起源和发展进行了详细的介绍。接着本书将认知无线电的基本要素分为——观测、决策和行动三部分,描述了这三部分的逻辑关系和作用,并对每一种基本要素可

能的解决方案进行了介绍和分析。最后,对认知无线电技术在实际应用中的关键问题——安全性、平台开发和规范进行思考,分析了需要解决的问题和可能的方案。文中实例丰富,语言生动易懂,可作为无线电工程师、研究人员、通信专业学生学习和使用。

全书由任品毅和张超共同翻译,其中第1章至第4章由张超翻译,其余章节由任品毅翻译。本书的部分翻译工作是在博士研究生吴广恩、王熠晨和尹稳山的帮助下完成的,在此表示感谢。在翻译的过程中,得到了本书的责任编辑鲍媛老师的大力协助,没有她的帮助,本书将难以完成,在此表示衷心的感谢。最后,译者对家人在翻译过程中的关心和支持表示深深的感谢。

原书中部分专业词汇还没有统一的翻译标准,译者采取了直译方式。由于译者的水平有限和不可避免的主观片面性,翻译不当或者表达不清之处在所难免,恳请广大读者及专家批评指正。

任品毅
张 超
于西安交通大学
2012 年 5 月

目 录

译者序

致谢

缩写词表

第 1 章 认知无线电的世界	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 历史和定义	(1)
1.3 新的频谱体制	(4)
1.4 超越频谱管理的认知无线电	(14)
1.5 应用领域	(17)
1.6 小结	(26)
参考文献	(26)
第 2 章 精要——概述	(27)
2.1 引言	(27)
2.2 建立理解认知无线电的知识背景	(27)
2.3 建立更深层次的理解	(31)
2.4 核心要点	(33)
2.5 额外的必要知识	(37)
2.6 本书的阅读指导	(37)
参考文献	(38)
第 3 章 采取行动	(39)
3.1 引言	(39)
3.2 理解行动发生的实际场景	(40)

3.3	通信系统的简述	(48)
3.4	行动的细节	(52)
3.5	通知接收机发射机的配置	(66)
3.6	小结	(70)
	参考文献	(71)
第4章	观测外部世界	(72)
4.1	引言	(72)
4.2	频谱感知的挑战	(74)
4.3	基本的感知系统	(77)
4.4	单独或者非协作频谱感知	(84)
4.5	协作频谱感知	(86)
4.6	从外部得到信息	(93)
4.7	回归更广泛的观测	(96)
4.8	小结	(97)
	参考文献	(98)
第5章	制定决策	(99)
5.1	引言	(99)
5.2	决策制定过程:第一部分	(99)
5.3	决策制定过程:第二部分	(112)
5.4	监管策略影响决策制定	(116)
5.5	决策制定过程:第三部分	(118)
5.6	小结	(123)
	参考文献	(124)
第6章	认知无线电中的安全	(125)
6.1	引言	(125)
6.2	能够观测的优缺点	(126)
6.3	协作的双面币	(129)

6.4	物理篡改认知无线电	(130)
6.5	单点故障	(130)
6.6	应用需求	(131)
6.7	安全行动的一个实例	(132)
6.8	一线希望	(133)
6.9	小结	(134)
第 7 章	认知无线电平台	(135)
7.1	引言	(135)
7.2	一个完整的认知无线电系统	(135)
7.3	认知无线电平台:数字硬件	(137)
7.4	认知无线电平台:模拟部分	(148)
7.5	认知无线电平台:其它设备	(157)
7.6	小结	(158)
	参考文献	(159)
第 8 章	认知无线电管理与标准化	(160)
8.1	引言	(160)
8.2	管理问题与新的频谱管理机制	(160)
8.3	认知无线电应用与管理	(175)
8.4	标准与国际活动	(177)
8.5	小结	(182)
	参考文献	(183)
第 9 章	总结	(184)
9.1	引言	(184)
9.2	简要总结	(184)
9.3	未来展望	(187)
	附录 A: 美国电视白空间的开发	(189)
	索引	(191)

第 1 章 认知无线电的世界

1.1 引言

认知无线电是一个非常有趣的主题,并且被认为将在未来无线通信系统中扮演重要的角色。本书主要涉及认知无线电的基本技术和规范。因为认知无线电技术还在蓬勃的发展中,所以撰写本书是一个巨大的挑战。认知无线电技术还存在很多争论,例如它的确切定义,它在通信系统中的作用,认知无线电是否应该被允许,如果允许那么规范应该是什么。然而,本书的目标是为了明确那些不会在认知无线电发展过程中变化的核心概念。因此,本章将简单地阐述本书的主要内容。

1.2 历史和定义

认知无线电的概念是由 Mitola 和 Maguire 在 1999 年的一篇文章中提出的^[1]。在该文中,Mitola 和 Maguire 将认知无线电描述为可以理解自己所处环境并且可以调整自己的通信过程使之与理解的环境相一致的一种无线电。因为认知无线电这个名字还在创造阶段,所以认知无线电的内涵在不断地增加和扩展,并且被应用到很多方面。基于此,定义认知无线电以及确立其在目前无线电技术中的地位是有必要的。

简单地讲,认知无线电就是一种非常智能的无线电。无线电设备在过去的几十年中变得越来越智能化。目前的通信系统都使用了可以自适应调整发射模式的无线电。例如,为了保证用户

之间不产生干扰而影响通信质量,3G 通信系统允许用户发射机动态地调整功率。移动电话为了消减接收信号在传播过程中引起的失真,可以智能地处理接收信号。WiMAX^① 系统可以调整信号参数来维持大吞吐量和链路可靠性。这些功能对于用户来说是不可见的,但是事实上目前我们使用的通信系统为了维持链路的连通性,确实能够根据所处的条件和环境进行自适应的调整。

在以上的例子中,自适应调整是预先定义的并且是可以被预测的。这些自适应调整是被直接的并且完全已知的情況所激活。我们继续以 WiMAX 系统为例来说明这一点。调制是将数据依附在无线电波上的过程。调制的阶数说明了无线电波上承载数据的紧密程度。高阶调制可以传输更多数据但是需要高的信号强度。低阶调制传输数据较少但是需要的信号强度也不高。一般来说,在基站附近的接收信号是非常好的,因此可使用高阶调制。相反,在 WiMAX 基站的边缘地区接受信号强度较差,因此系统调整为较低阶的调制模式来维持链路质量和连接的可靠性。调制模式随距基站的距离不同而改变的关系在图 1.1 中进行了说明。这样的调制模式被称为自适应调制,也就是在接收机的信号强度和发射调制模式之间建立了一种简单的对应关系。

认知无线电不仅具备这种自适应的调整能力,而且还是这种能力的进一步发展。对于这一点我们主要说明两件事。第一就是自适应的级别被极大提高并且被用于任何可操作的参数上。例如载波频率、功率、调制模式、天线波束模式、电池效用、处理器效用等等。第二就是自适应的触发条件可以是已规划的也可以是未规划的。后者可以通过无线电模式识别,对过去经验和再次发生情况的学习以及对未来时间预测的反应来实现。这样就可以给出认知无线电的定义。

认知无线电是一种具有 4 种输入的技术,即对自己工作环境

^① WiMAX 是一种无线数字通信系统,也称为 IEEE 802.16。这个标准是为无线城域网而设计的。

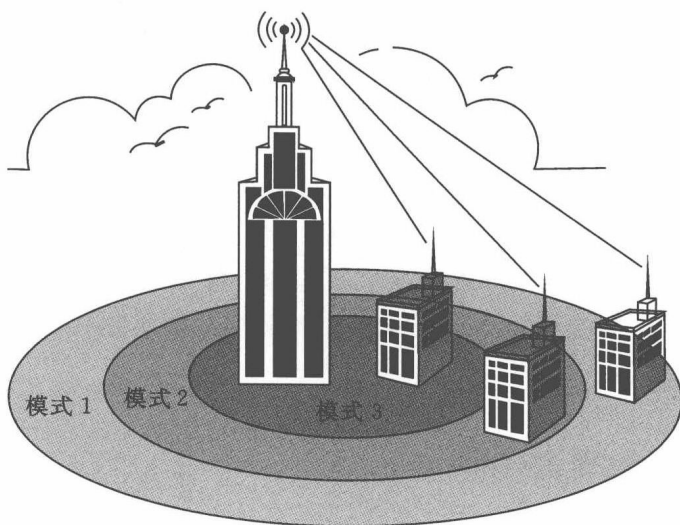


图 1.1 WiMAX 系统中的自适应调制方案

的理解、用户对通信系统需求的理解、对应该使用哪种规范策略的理解以及对自身能力的理解。换句话说,认知无线电是一种完全能够意识到自身所处环境的技术。认知无线电根据这些输入的信息自行判断如何配置自己的系统从而使得目前的通信任务顺利完成。在判断如何配置自己的过程中,无线电不仅能够根据需求采取匹配的方案,而且还能够意识到可能存在的约束和冲突。认知无线电具有学习自己的行为并且将学习的结果反馈到未来行为当中的能力。认知无线电由软件和能够实现通信中需要的各种配置的硬件构成。

也许这样的定义可能不利于认知无线电的推广,但是却揭示了认知无线电的基本要素^①。认知无线电如何获得需要的输入,如何处理获得的信息,如何确定什么样的配置适合自己,如何执行判断的结果以及如何处理学习结果是本书的主要关注点。然

^① 目前正努力制定更加详细的定义。例如 IEEE1900.1 下一代无线电系统与频谱管理术语与概念工作组已经制定了一些标准定义。

而,在回答这些问题之前,首先需要回答一个问题,我们为什么需要认知无线电?毫无疑问,认知无线电比任何现有的无线电都要复杂,而且这种额外复杂的必要性也必须被认可。

简单的回答就是,利用认知无线电我们能够处理目前我们不能处理的新的任务,并且能把过去可以处理的任务做得更好。新的任务主要是指新的频谱管理体制。可以做得更好的任务是指自组织和复杂度不断增加的通信系统的管理领域。总的来说,认知无线电将会使得在具有极大压力和挑战的环境中进行通信成为可能。

1.3 新的频谱体制

我们首先看一下认知无线电在频谱管理中的作用。我们这么做有两个原因。第一就是从历史上讲,认知无线电最早的应用动机就是在频谱管理中被提出的,尤其是与动态频谱接入有关的内容。动态频谱接入的概念我们将在后面的章节中进行详细的介绍。第二个原因就是认知无线电中更广泛的应用都是利用了动态频谱管理中的基本技术。一般来说,频谱管理就是频谱如何使用和如何分配的过程。频谱管理的主要目的是在不同用户干扰处于可控的范围内时使得频段内可容纳的用户尽可能得多,从而最大化社会效益^[2]。随着旧的静态频谱管理体制的远去,新的动态频谱管理体制即将到来,而认知无线电将扮演一个重要的角色。

1.3.1 现有的体制

从历史上讲,目前全世界频谱管理者采用的频谱管理方法都是约定俗成的。典型地讲,管理者决定了频率或者一段频段的使用、频率上运行的业务、频率上使用的技术以及频率和业务的使用者。这就是所谓的行政管理方式。短语“命令与控制”就是用于描述这种方式,或者用于表示在频谱管理中忽视市场需求的传

统方法。

整个无线电频谱管理被分为若干块或者频段,这些频段经常为某一类服务而划分。频率划分经常是以国际或者国家的层面上来进行的。一般来说,国际组织更倾向于给出较高层次的指导意见,而国家组织则给出具体的频谱划分政策。频谱管理的最高层次管理者是国际电信联盟(ITU),它是联合国专门设置的频谱管理机构。ITU 的无线频谱管理部门将 $9\text{kHz}\sim 275\text{GHz}$ 的无线电频谱划分为可用频段。在一些情况下,一些多国组织会协调交叉使用这些频段。在这方面欧盟(EU)就是一个很好的例子。在国家层面,国家的管理授权机构管理每天的频谱使用情况,并且保证与 ITU 以及欧盟的政策一致。在国际规定的频谱范围内,国家的管理授权部门可以进行更加详细的信道规划。例如,分配给陆地移动服务的频段被分为三个部分,并且分别授权给商业用户、公共安全用户以及蜂窝网用户。这样做的结果就是,这些划分的频段只能由授权的用户使用。

这种过紧的控制方法对于管理者来说是非常具有吸引力的,因为通过这种方法,信道的干扰是可以控制的。所有的通信系统都会产生一定程度的干扰。关于干扰的产生将在第 3 章中进行详细描述,这里简单地认为干扰是影响正确接收发射信号的信号失真。广义上讲,干扰来源于相邻频段上或者相同频段上但是地理位置不同的业务之间一种不协调的相互作用。因为管理者能够详细地给出不同频段或者相同频段不同位置业务的相互干扰模型和恰当的频谱规划,所以这种管理方法使得管理者能够轻松地保证不产生过多的干扰。例如,这种规划方法在不同服务或者最大传输功率情况下会在频谱规范上保留一段保护频段。保护频段是一段刻意预留的空白频段,其目的就是保证频段上相邻的业务工作频率不会重叠。图 1.2 刻画了这种概念,并且从图上可以看到频率上严格保护的不同服务^①。在图 1.2 中,相邻服务就

① 这幅图来源于英国通讯管理委员的报告(<http://www.ofcom.org.uk/consult/condocs/sur/spectrum/>)。

是指分配频率上相邻的服务。当然,相邻服务也可以在空间上进行定义,此时以上提到的功率限制将会起到非常重要的作用。第3章将对这方面的内容进行详述。

因此,一旦进行了频率分配,那么频谱管理过程的下一步就是频率指配。指配的规则是在国家层面进行的,也就是将某一段频谱规定为某种无线电业务的专属使用频段。对于频谱的具体指配有大量的方法可以应用。在对频谱要求有限的情况下,像先到先得的简单方法可以被使用。然而,当对频谱的需求很大时,应该使用更加复杂的机制。例如,在刚刚提到的3G频段,全世界的管理机构都采用竞选和拍买的方式来指配移动通信的频段。当然不是所有的频段都需要付钱。在刚刚提到的3G频段,大量的钱用于频率的指配。然而,在另一方面,很多国家的公共电视广播和军事用户不需要为频段付费。这里主要的目的不是让读者获得对目前频谱管理体制和管理机构的深刻理解,而是突出这样的事实——从技术和经济的角度来看集中式频谱管理体制是频谱管理方法中的一个关键部分。Cave 等人在参考文献[2]中对频谱管理方法进行了很好的概括。^①

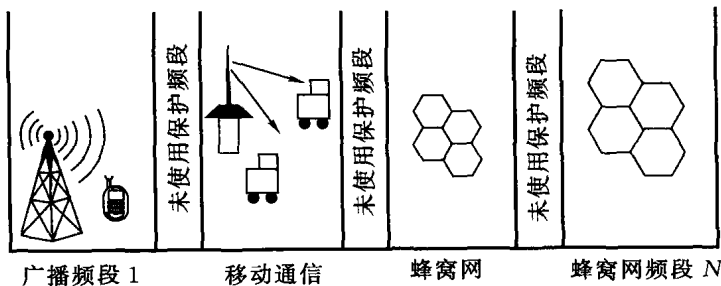


图 1.2 过紧的频段分配方法

虽然行政管理方式对于管理结构、管理当局以及用户来说一定程度上也具有很大吸引力,但是这种方式有很多缺点。频率规

^① 竞选就是对感兴趣的竞争者进行判断和排序的过程。

划规定了频段上允许的服务以及频段上运行的设备,但是很难跟上新技术的革新和发展。潜在的频谱用户可以申请进行频谱分配,例如,对于以前没有进行分配的频段的新通信技术,那么这项技术就不能有更进一步发展。因此,例如获得 3G 频段使用权的运营商就不能在 3G 市场已经建立的时候在该频段上提供其他服务。同样,运营商也不能在 2G 的频段上运行 3G 服务。频率划分的过程本身就会迫使管理机构选择胜利者。这将是一个困难的任务,而且将管理机构放在这样的位子上本来就并非是明智和有效的^①。这样将会限制对那些正在寻找频谱资源并且将无线电频谱视为稀缺资源的人的鼓励和刺激。

一方面无线电频谱被认为是稀缺的,然而,另一方面却有不同的情况。图 1.3 给出了都柏林城 2007 年 4 月份无线电频谱上的占用情况。这些数据是 Shared Spectrum 公司通过专用设备从某一天晚上 6 点开始连续 40 个小时测量得到的结果。这幅图是 Shared Spectrum 公司大量结果中的一个典型数据,这些测量结果都说明存在大量未被使用的频谱^②。事实上,频谱占用率低到 10% 的测量图都被认为真实地反映了频谱使用情况。

图 1.3 中间的图非常值得注意。该图给出了 1400MHz~1520MHz 的频谱占用情况^③。可以看出,有很多的频率上并没有发射机存在。传输的暂时性也可以很清楚地被看到。特别是 1500MHz~1520MHz 范围展示了在两个晚上时间跨度上一个暂时性非常强的频谱占用行为。因此这里的重点是,尽管以上的频段都被分配给特殊的应用然而却没有被完全利用。

对行政管理方式缺点的认识已经促进了对于新频谱管理方式的寻找。目前已提出很多种创新方法,并且对于哪一种是最优

① 有一个例子就是欧洲 ERMES 系统和 TFT 飞行电话系统的频率分配。这些频谱二十多年来一直无人使用。

② Shared Spectrum 公司在很多城市做了大量的测量,请见 <http://www.sharedspectrum.com/>。

③ 请注意图 1.3 的频谱占用情况是由一个固定位置的无线电测量的,其他的无线电测量结果可能不同。

ComReg collection-start:16/Apr/2007,18:20:30 stop 18/Apr/2007,12:09:00

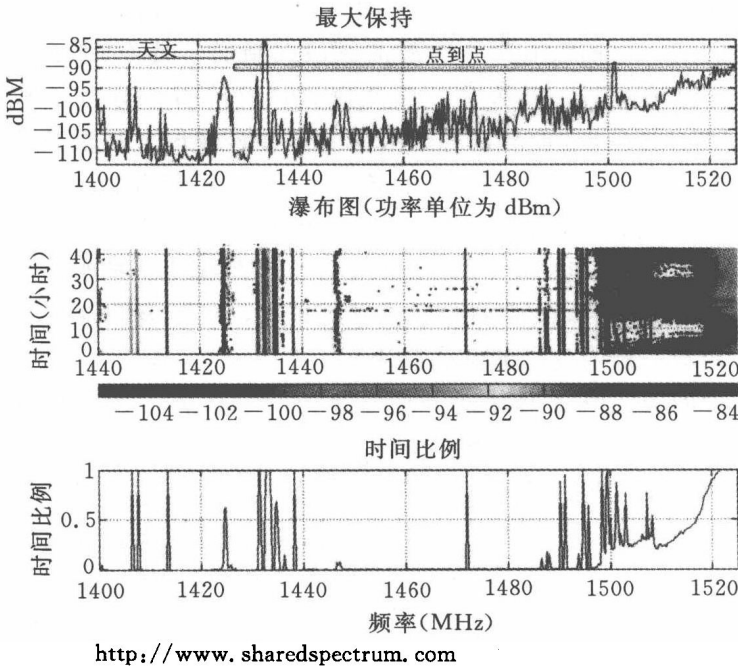


图 1.3 Shared Spectrum 公司 2007 年 4 月在都柏林测量的结果

的也进行了大量讨论。本书主要的焦点就是讨论与认知无线电相关的新频谱管理方法。以下我们从动态频谱接入开始介绍。

1.3.2 动态频谱接入体制

图 1.3 和其他一些测量数据都说明需要进行动态的频谱接入。这个意思就是说,不是静态的分配给无线电一段频谱,而是允许其使用未被使用的频谱或者能找到的白空间(white space)。这就是动态频谱接入的实质内容。动态接入方式具有利用浪费掉的频谱资源的潜力。因为动态接入技术意味着更多的频谱可以使用,所以频谱的开发可以减少新技术发展阻碍的潜力。

第一个关于动态频谱接入的例子就是新用户使用其周围用户未使用的频段。从图 1.3 可以看到,有些频段很长时间未被使

用,而且又有一部分频段仅仅晚上被占用。还有一些其他从图上不容易看到的服务也会持续更短,也许几分钟甚至几秒钟。不同的应用适用于不同的时间跨度。

动态频谱接入的概念主要是围绕着授权用户和非授权用户之间的频谱共享。在这种情况下,频段的持有者被称为主用户。这些授权用户具有接入该授权频段的优先权,而次用户只有当主用户不使用该频段时才可以使用。当主用户重新开始传输时,次用户就会停止使用该频段。为了达到这个目的,次用户需要能够检测白空间,并且能够配置自己在白空间上传输,以及能够检测主用户重新开始工作。从 1.2 节的定义来看,很显然这在其定义的许可范围内。次用户需要具备检测白空间和在白空间传输时保证不干扰其他主用户的能力。因此,频段就被具有接入优先权的授权用户和次用户进行了共享。一种衬底选择也是存在的。在这种频谱共享机制中,次用户使用非常低的传输功率与授权用户同时传输信号,该低功率信号要求不影响授权用户的信号传输。当然,认知无线电通过学习空频频段可用性的模式能够细化自己的频谱接入方法,甚至能够预测未来的频谱可用性。图 1.4 给出了动态频谱接入的示意图。

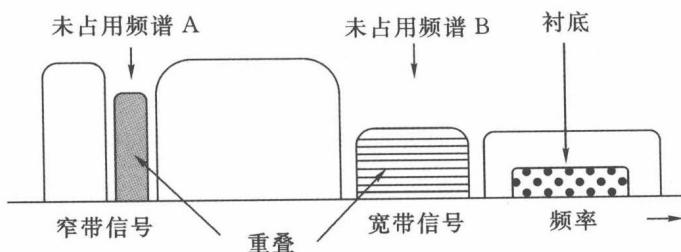


图 1.4 动态频谱接入

需要注意的是,动态频谱接入的实现和认知无线电是同义的。例如,大多数讨论认知无线电的文章开始都是研究作为次级非授权用户的认知无线电设备如何以衬底或者覆盖的方式与主用户共存运行。值得强调的是,本书作为一个概述对认知无线电