

# 认知无线电 及频谱管理

Cognitive Radio  
and Spectrum  
Management

黄标 李景春 谭海峰 方箭 等 编著

# 认知无线电 及频谱管理

Cognitive Radio  
and Spectrum  
Management

黄标 李景春 谭海峰 方箭 等 编著

人 民 邮 电 出 版 社

北 京

## 图书在版编目 (C I P) 数据

认知无线电及频谱管理 / 黄标等编著. — 北京 :  
人民邮电出版社, 2014. 11  
ISBN 978-7-115-30977-8

I. ①认… II. ①黄… III. ①无线电技术—频谱—无  
线电管理 IV. ①TN014

中国版本图书馆CIP数据核字 (2013) 第036093号

## 内 容 提 要

本书对认知无线电的关键技术进行了详细介绍, 如检测算法、动态频谱管理等, 同时重点分析了认知无线电的频谱管理政策, 主要包括: 现行的频谱政策、认知无线电技术对现行频谱政策的影响以及未来的建议等。

本书的主要读者对象为从事无线电频谱管理的技术人员和管理人员。

- 
- ◆ 编 著 黄 标 李景春 谭海峰 方 箭 等  
责任编辑 梁 凝 杨 凌  
责任印制 程彦红
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号  
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
北京铭成印刷有限公司印刷
- ◆ 开本: 700×1000 1/16  
印张: 19.75 2014 年 11 月第 1 版  
字数: 284 千字 2014 年 11 月北京第 1 次印刷
- 

定价: 68.00 元

读者服务热线: (010)81055488 印装质量热线: (010)81055316  
反盗版热线: (010)81055315

# 前 言

随着社会经济的发展,无线通信已应用于各行各业,并取得了飞速发展。公众移动通信已由第二代移动通信向第三代移动通信过渡并向 LTE 演进,呈现出移动化、宽带化、多媒体化的特征。另外,无线电传感网络、调度网络、监控网络、定位网络和服务网络等无线电系统将覆盖电力、能源、交通、医疗、安全、物流等诸多专用通信领域,为无线电技术的应用和发展开拓了更加广阔的空间。应运而生的是频率需求也大幅增长,如此大的频谱需求使得频谱资源的供需矛盾问题日益突出,对无线业务的影响日益严重,已经成为未来制约无线移动通信领域发展的瓶颈之一。由此带来的是电磁环境的日益复杂和无线电频谱日益“拥挤”,如何充分、高效、合理地使用频谱资源等是无线电管理部门和业务运营企业所共同面临的急需研究的重要课题。

目前,频谱资源主要由国家统一管理,其管理方式是以固定频谱管理方式为主,即国家将频谱资源分配给不同的无线电部门和相应的无线接入技术。在传统的静态频谱使用政策下,频谱资源的利用呈现出高度的不均衡性。那些利用率较低的频谱的资源存在着动态、大小不一、零散等特征,认知无线电技术利用动态频谱分配思想,实现了频谱的高效利用,在一定程度上能缓解频谱资源短缺的问题。但是,由于动态频谱的使用方式呈现动态性、主次性、不连续性、时变性,这也给传统的无线电管理带来巨大挑战。本书编写组根据国家科技重大专项“面向 WRC11 的频谱有效利用关键技术研究及验证(2009ZX03007-004)”、“宽带无线移动频谱规划与干扰分析

(2008ZX03007-002)”和国家高技术研究发展计划(“863 计划”)“动态频谱资源共享技术标准与应用研究(2009AA011806)”的部分研究成果,从认识无线电关键技术的背景出发,简要地介绍了其关键技术、组网特性等,根据认知特点分析了认知无线电对传统无线电管理的影响并对认知无线电中有关频谱管理提出了建议。

本书从组织结构上分为两个部分,共 9 章。

第一部分是认知无线电理论技术方面的内容。第 1 章主要阐述了认知无线电的起源、概念、基本特征以及国内外的研究现状。第 2 章重点介绍了认知无线电中频谱检测、数据库等信息获取技术、无线资源管理、传输技术、重配置技术等方面的内容。第 3 章从认知网络的定义、架构、频率共享方式等多方面对认知网络进行阐述,并对认知网络以实例进行进一步说明。第 4 章在前面的理论基础上,对典型基于电视频段白频谱的认知 TD-LTE 系统应用进行了研究,分析了当前模拟、数字电视系统的特点,基于此重点分析了在广播电视系统中如何进行频谱检测,并进一步介绍了基于 TD-LTE 的认知试验系统。

第二部分是认知无线电频谱管理的研究。第 5 章阐述了现有无线电管理的目标、手段、内容等,以及其他国家现有的无线电管理模式。第 6 章从技术基础、需求、优势、挑战等方面分析了认知无线电对现有无线电管理模式的影响。第 7 章仍以白频谱段为例,分析数字电视系统与基于 TD-LTE 的认知无线电系统之间的共存问题,并提出认知系统引入后的技术指标要求。第 8 章在分析认知无线电市场和国内形势的基础上,从法律、行政、经济、技术等方面对无线电频谱管理提出了建议,进一步分析了其他国家认知无线电政策的建议。第 9 章分析了认知无线电未来在军事、应急通信、公众通信等各方面的潜在应用和发展趋势。

本书编写组的研究工作由国家科技重大专项“面向 WRC11 的频谱有效利用关键技术研究及验证(2009ZX03007-004)”、“宽带无线移动频谱规划与干扰分析(2008ZX03007-002)”和国家高技术研究发展计划(“863 计划”)“动态频谱资源共享技术标准与应用研究(2009AA011806)”资助,得到了课题组成员国家

无线电监测中心、北京邮电大学、电子科技大学、上海无线中心、大唐电信集团、中兴公司、电信研究院以及 CCSA 成员单位等的大力支持，并引用了部分研究成果，也得到了国家无线电监测中心的领导以及有关同志的大力支持和帮助，在此表示深深的谢意。

由于编者水平有限，并且认知无线电研究和频谱管理都处于研究和发展当中，本书中的错漏、缺点在所难免，希望读者批评指正。

编者

2014 年 3 月

# 目 录

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 第 1 章 概述                 | 1   |
| 1.1 认知无线电的概念             | 3   |
| 1.2 认知无线电的基本特征           | 7   |
| 1.3 传统无线电、软件无线电和认知无线电的关系 | 8   |
| 1.4 认知无线电在国内外的技术发展现状     | 9   |
| 1.5 相关标准组织进展情况介绍         | 10  |
| 第 2 章 认知无线电关键技术          | 25  |
| 2.1 认知信息获取技术             | 26  |
| 2.2 无线资源管理               | 50  |
| 2.3 物理传输技术               | 75  |
| 2.4 重配置技术                | 83  |
| 第 3 章 认知网络               | 91  |
| 3.1 前言                   | 91  |
| 3.2 认知网络的定义              | 91  |
| 3.3 认知网络的架构              | 92  |
| 3.4 完全认知网络               | 99  |
| 3.5 认知网络的频率共享            | 103 |
| 3.6 认知网络架构实例             | 105 |
| 第 4 章 基于电视频段白频谱的认知系统     | 129 |

|       |                           |     |
|-------|---------------------------|-----|
| 4.1   | 实现方案的考虑 .....             | 130 |
| 4.2   | TD-LTE 系统 .....           | 134 |
| 4.3   | 模拟和数字电视系统 .....           | 136 |
| 4.4   | 认知无线电对电视信号的感知算法 .....     | 146 |
| 4.5   | 基于 TD-LTE 的认知试验系统 .....   | 155 |
| 第 5 章 | 现有无线电频谱管理模式 .....         | 161 |
| 5.1   | 无线电管理的目标 .....            | 161 |
| 5.2   | 无线电管理的手段 .....            | 163 |
| 5.3   | 无线频谱管理主要内容 .....          | 166 |
| 5.4   | 无线电频谱管理的技术基础 .....        | 187 |
| 5.5   | 其他国家频谱管理模式 .....          | 190 |
| 第 6 章 | 认知无线电对传统无线电频谱管理的影响 .....  | 192 |
| 6.1   | 认知无线电频谱管理的技术基础 .....      | 192 |
| 6.2   | 认知无线电频谱管理需求 .....         | 199 |
| 6.3   | 基于认知无线电技术的频谱管理模式的优势 ..... | 202 |
| 6.4   | 认知无线电对频谱管理带来的问题和挑战 .....  | 203 |
| 第 7 章 | 数字电视与认知无线电系统的共存 .....     | 208 |
| 7.1   | 共存干扰机制 .....              | 209 |
| 7.2   | 干扰场景 .....                | 210 |
| 7.3   | 共存研究方法 .....              | 211 |
| 7.4   | 典型参数 .....                | 213 |
| 7.5   | 共存评估指标 .....              | 220 |
| 7.6   | 建议 .....                  | 222 |
| 第 8 章 | 对无线电频谱管理的建议 .....         | 224 |
| 8.1   | 认知无线电市场前景 .....           | 224 |
| 8.2   | 我国认知无线电政策现状 .....         | 225 |
| 8.3   | 对我国无线电频谱管理的建议 .....       | 226 |
| 8.4   | 其他国家对认知无线电的政策及建议 .....    | 239 |



|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 第 9 章 认知无线电的应用 .....                | 243 |
| 9.1 军事通信中的应用 .....                  | 243 |
| 9.2 应急通信中的应用 .....                  | 247 |
| 9.3 公众网络中的应用 .....                  | 248 |
| 附录 1 DTV 覆盖半径的计算方法 .....            | 256 |
| 附录 2 IMT 与广播系统共存 ACIR 建模 .....      | 258 |
| 附录 3 仿真中 TD-LTE 上行功率控制算法 .....      | 266 |
| 附录 4 TD-LTE 系统的链路级性能模型 .....        | 267 |
| 附录 5 DTV 系统与 TD-LTE 系统共存确定性计算 ..... | 268 |
| 附录 6 DTV 系统与 TD-LTE 系统共存仿真 .....    | 286 |

# 第 1 章 概 述

无线通信是以电磁波为媒介传输信息的，近几年无线通信业务得到了飞速发展，公众移动通信用户数量持续增长，截至 2011 年 3 月底，中国的移动用户总数已经达到 8.7 亿。而且，随着移动互联网业务或 M2M 等潜力巨大的新应用和新业务的出现，移动数据业务得到越来越广泛的应用，用户的数据速率不断攀升，使得无线频谱需求呈指数级迅猛增长。

众所周知，无线电频谱资源是一种宝贵的、有限的自然资源，对频谱资源的合理管理极为重要。为了避免不同无线电业务之间、不同通信技术体制之间的干扰，实现各种业务或系统之间的共存，当前世界上大多数国家采用命令和控制的方式来管理频谱分配，由政府无线电主管部门统一进行无线电频率的划分、分配和指配，为不同类型的通信业务或通信系统分配不同的频段，这种管理模式是一种静态的频谱分配策略。在静态的频谱分配策略下，总的频谱资源规划分为授权频段和非授权频段。

非授权频段属于免执照频段，仅占很小一部分。这种免执照频段，只适用于微功率、短距离设备或系统以及部分无线接入系统，这些设备或系统可在一定规范下竞争式免费共享该段频谱，如工业、科学和医学频段 (Industrial Scientific and Medical, ISM)，用户或系统之间的相互干扰由自己承担。

授权频段占据整个频段的绝大多数。在授权频段中，一般一个频段只分配给一种无线通信系统独立使用，不同的无线通信系统使用不同的频段。而且，一旦某个单位（公司）或个体得到某一频段的授权，这个单位（公司）或个体

在授权使用的有效期内具有该段频谱的专有使用权,任何其他单位或个人接入该段频谱都属于非法行为。

基于上述静态频谱管理方式,很多国家都将本国的大多数可用频谱分配完毕,留给新系统、业务和技术的频谱非常少,已经很难再找到连续的大段频谱来分配了。这种静态的无线频谱管理方式的好处是:简单而有效地避免了不同无线通信系统间、不同无线电用户之间的相互干扰。但是,随着无线通信的迅速发展,人们对频谱资源的需求越来越大,频谱资源日趋匮乏,如何高效合理地使用有限的频谱资源,是无线电管理部门以及广大无线电应用和研发部门共同面临的问题。

在传统的静态频谱使用政策下,频谱资源的利用呈现出高度的不均衡性,图 1-1 显示了美国部分频段的监测情况,图 1-2 为我国特定地区 470~806MHz 频段的频谱监测情况。从图中可以看出,部分频率的频谱利用率很高,甚至被过度使用,而另一部分的频谱利用率很低,只是有时被占用,甚至没有使用,从而造成一定程度上的浪费。那些利用率较低的频谱资源存在着动态、大小不一、零散等特征,如何及时发现、高效利用并且避免对授权系统的干扰成为亟待解决的复杂问题。因此,迫切需要新的无线网络技术,基于自身

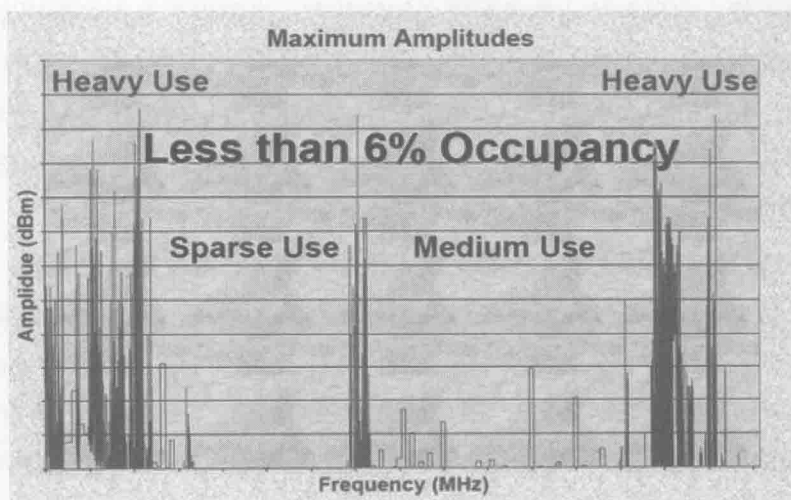


图 1-1 美国部分频谱利用率

能力, 适应电磁环境和业务类型的动态变化, 实现频谱资源的高效再利用。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, 因此需要详细探讨频谱资源的合理、高效利用技术。认知无线电 (Cognitive Radio, CR) 技术就是一种智能的频谱共享技术, 它可感知频域、时域和空域等周围无线电频谱环境, 通过对环境的理解、主动学习等措施, 自动搜寻并利用已授权频段的空间频谱而不影响其他授权用户, 实现不可再生频谱资源的再利用, 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, 对有效解决如何在有限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。

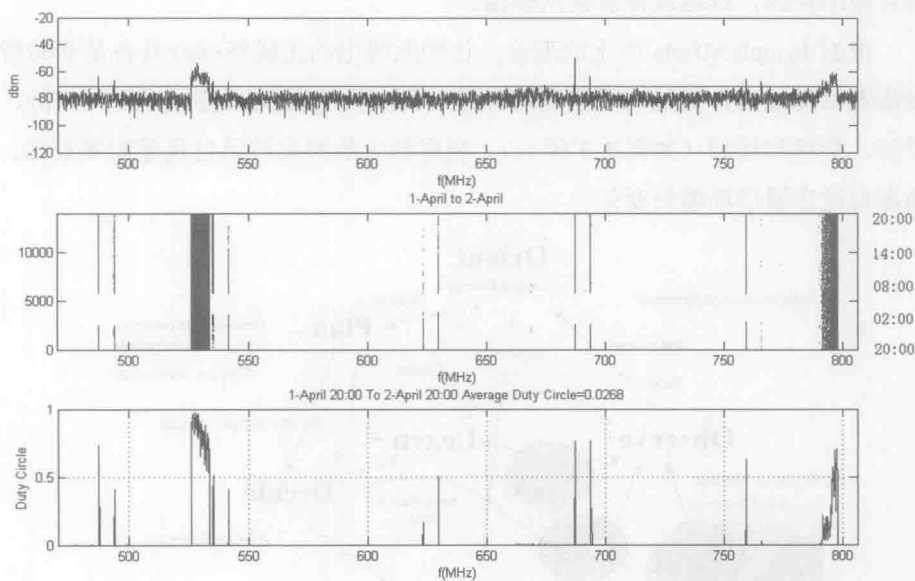


图 1-2 我国特定地区的部分频谱使用情况

## 1.1 认知无线电的概念

认知无线电的概念最初由 Joseph Mitola 博士于 1999 年提出。随着认知无线电的发展, 其研究和应用都不再局限于最初的范畴, 不同的研究者从不同

角度给出了认知无线电的定义和内涵。

### 1. Joseph Mitola 博士提出的认知无线电定义

Joseph Mitola 博士根据最初对认知无线电的定义，在其博士论文中加以拓展，并系统地阐述了认知无线电的内涵，给出了下述有关认知无线电的定义。

“认知无线电这个术语是指这样一个观点，即在无线通信和相关的计算机与计算机之间通信方面，无线个人数字助理 (Personal Digital Assistant, PDA) 及相关的网络能够具有足够的计算智能，包括检测用户的通信需求作为使用环境的函数以及提供最符合这些需求的无线资源和服务。于是，认知无线电设备能够为无线传输自动选择最好和最便宜的服务，甚至能够根据目前或即将可用的资源，延迟或提前某次传输。”

根据 Joseph Mitola 博士的理论，认知无线电的无线终端应具备足够的智能或者认知能力，通过对周围无线环境的历史和当前状况进行检测、分析、学习、推理和规划（如图 1-3 所示），利用相应的判定结果自我重配置资源，动态自适应通信环境的变化。

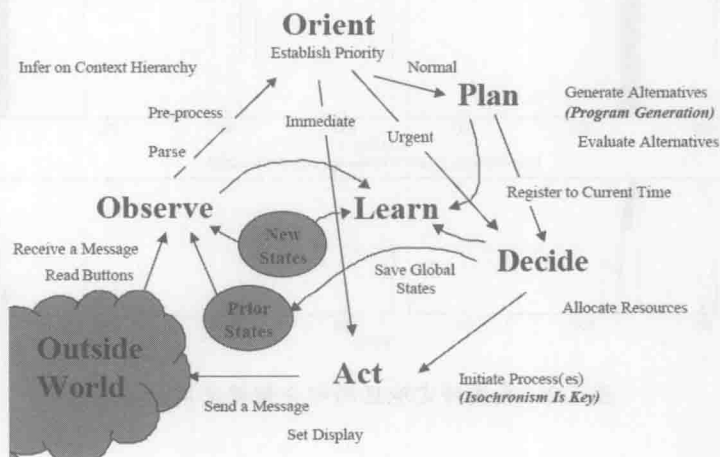


图 1-3 Joseph Mitola 提出的认知环

Joseph Mitola 博士从业务层面，阐述认知无线电能够使用人工智能等技术帮助用户自动选择最好的、最廉价的服务进行无线数据传输。同时，他也指出由于认知无线电能够根据无线环境调整自己的传输参数，使用最适合的无

线资源（包括频率、调制方式、发射功率等）完成无线数据传输，因而可以有效提高无线频谱利用率。在后来的发展中，认知无线电最倍受关注的优势就是无线用户可以通过该技术实现“频谱共享”，这为缓解频谱资源短缺带来了新的思路。

## 2. Simon Haykin 提出的认知无线电定义

2005 年初，著名学者 Simon Haykin 综合 Joseph Mitola 博士强调的认知无线电具备人工智能的特点和 FCC 强调的认知无线电可以根据环境改变发射参数的特点，对认知无线电作了如下定义。

“认知无线电是一个智能无线通信系统。它能够感知外界环境，并使用人工智能技术从环境中学习，通过实时改变某些操作参数（比如传输功率、载波频率和调制技术等），使其内部状态适应接收到的无线信号统计特性变化，以达到以下目的。

- (1) 任何时间、任何地点的高度可靠通信；
- (2) 对频谱资源的有效利用。”

Simon Haykin 根据上述定义，从信号处理的角度全面总结了认知无线电技术的 3 个关键功能（如图 1-4 所示）。

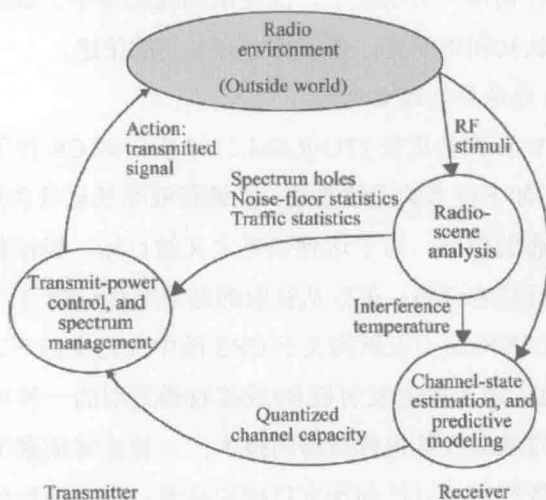


图 1-4 Simon Haykin 提出的认知环

(1) 无线环境分析, 包括无线环境中干扰温度的估计和频谱洞的检测。

(2) 信道状态估计与预测建模, 包括信道状态信息的估计和信道容量的预计。

(3) 发射功率控制与动态频谱管理。

### 3. FCC 提出的认知无线电定义

随着通信系统对频谱资源需求的不断增加, 美国联邦通信委员会 (FCC) 开始重新考虑频谱管理政策。2003 年 5 月, FCC 召开了认知无线电研讨会, 讨论了利用认知无线电技术实现灵活频谱利用的相关技术问题。FCC 把任何具有自适应频谱感知能力的无线电称为认知无线电, 此后, FCC 在 2003 年 12 月发布的一则通告中给出了认知无线电的定义。

“认知无线电是指能够通过与工作环境的交互, 改变发射机参数的无线电设备。认知无线电的主体可能是软件定义的无线电设备 (Software Defined Radios, SDR), 但对认知无线电设备而言, 不一定必须具有软件或者现场可编程的要求。”

从这个定义可以看出, 认知无线电具备以下两个基本能力: 认知能力和重配置能力。认知就是能够通过与工作环境的交互来捕捉和感知信息; 重配置就是在不改变任何硬件的情况下, 改变诸如载波频率、调制技术和传输功率等参数。关于认知和重配置, 在下文中有专门的论述。

### 4. ITU 提出的认知无线电定义

2009 年, ITU-R 在其报告 ITU-R SM.2152 中, 对 CR 作了如下定义。

“一个使用了如下技术的无线系统: 能够获取系统运营和地理环境、建立策略以及中间状态的信息; 为了达到预先定义的目标, 根据获取知识能对运营参数和协议进行动态调整; 可以从获取的结果中进行学习。”

另外, ITU 在其网站上更新的关于 CRS 的中文定义如下。

“认知无线电, 即无线电发射机和/或接收器采用的一种可以了解其操作和地理环境、确定政策及其内部状态的技术; 一种能够根据了解到的情况动态和自动调节参数和协议以达到预定目标的技术; 也是一种可从了解到的结果中汲取经验的技术。”

## 1.2 认知无线电的基本特征

上节我们介绍了认知无线电的各种定义，它们虽各有不同，但这些定义中涉及到两个基本概念，即认知能力和重配置能力，这就是认知无线电的两个基本特征。

### 1. 认知能力

在以寻找并利用空闲频率为目的的认知无线电中，认知能力使认知无线电系统能够从其工作的无线环境中捕获和感知相关的频谱使用信息，从而可以标识特定时域、频域和空间域内使用的频谱资源（频谱空洞），并选择最适当的工作频段和工作参数；在以优化服务、自适应地接入多种无线接入网为目的的认知无线电中，认知能力还能够获得相关无线接入网的网络情况、协议参数、服务价格等信息，从而选择最适当的无线接入网及服务。

根据瑞典皇家科学院（KTH）使用的认知循环，认知能力主要包括频谱感知、频谱分析和频谱判定 3 个步骤。频谱感知的主要功能是监测可用频段、分析信号、发现频谱空穴；频谱分析的主要功能是估计频谱感知获取的频谱空穴特性；频谱判定的主要功能是根据频谱空穴的特性和用户需求选择合适的频段传输数据。

### 2. 重配置能力

在以寻找并利用空闲频率为目的的认知无线电中，重配置能力使得认知无线电系统可以根据工作频段和工作参数动态编程，对发射机进行重配置。在以优化服务、自适应地接入多种无线接入网为目的的认知无线电中，重配置能力使得认知设备还可以采用不同的无线传输技术接入不同的无线接入网并传输数据，其可重配置的参数除了工作频率、调制方式、发射功率之外，还包括底层、上层通信协议等。

在不对频谱授权用户产生有害干扰的前提下，利用授权系统的空闲频谱提供可靠的通信服务，这是重配置的核心思想。当该频段被授权用户使用时，认知无线电有两种应对方式：一是切换到其他空闲频段进行通信；二是继续使用该频段，但改变发射功率或者调制方式，以避免对授权用户造成有害干扰。



### 1.3 传统无线电、软件无线电和认知无线电的关系

对于传统的模拟无线电系统,其射频部分、上/下变频、滤波及基带处理全部采用模拟方式,某个频段、某种调制方式的通信系统都对应专门的硬件结构。与传统无线电系统相比,软件无线电(SDR)系统的A/D、D/A变换移到了中频并尽可能地靠近射频端,对整个系统频带进行采样,即从中频(甚至射频)开始就进行数字化处理,这是软件无线电的一个突出特点。而认知无线电(CR)是建立在软件无线电的基础之上,采用了随时变化的通信协议技术。同时增加了一个新的元素——依靠人工智能的支持,感知其所在的环境及其所处位置,并在此基础上改变其功率、频率、调制以及其他参数,以获得更高的频带利用率,即确定绕过障碍的最佳传输路径。三者结构如图1-5所示。

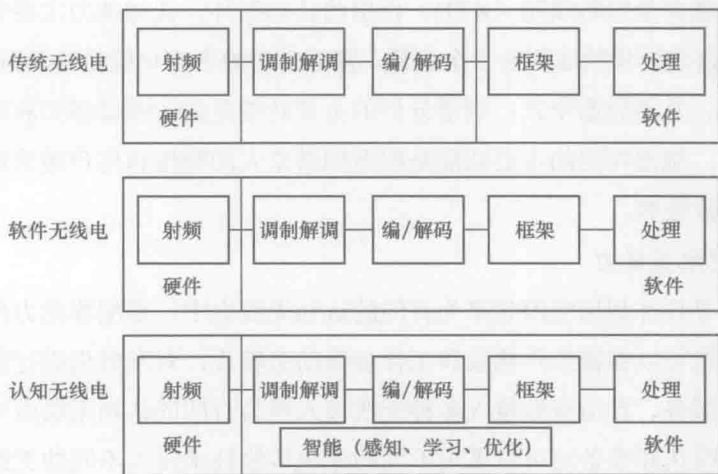


图 1-5 3 种技术结构对比

由图 1-5 可见,SDR 关注的是采用软件无线电实现无线电系统信号的处理,而 CR 强调的是无线电系统能够感知操作环境的变化,并据此调整系统工作参数,实现最佳匹配。从这个意义上讲,CR 是更高层的概念,不仅包括信号处理,还包括根据相应的任务、政策、规则和目标进行推理和规划的高