

移动通信前沿技术丛书

感知无线电技术 及其应用

谢显中 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

TN92/90

2008

移动通信前沿技术丛书

感知无线电技术及其应用

Cognitive Radio Technology and Application

谢显中 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书探讨感知无线电技术及其应用方面所涉及的主要技术和研发情况,首先总结了国内外关于感知无线电技术和应用的研发现状与进展,然后分别论述感知无线电的空闲频谱感知检测、频谱利用和分享、无线传输方案等关键技术,最后对感知无线电系统的网络结构和测试床、IEEE 802.22 感知无线电系统等进行全面介绍分析。

本书适用对象为通信、电子、计算机应用及相关专业的研究生、教师、科研和工程技术人员,还可作为研究生一学期的教学用书。

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

感知无线电技术及其应用/谢显中编著. —北京:电子工业出版社, 2008.4

移动通信前沿技术丛书

ISBN 978-7-121-06007-6

I. 感… II. 谢… III. 无线电通信—通信技术 IV. TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 018268 号

责任编辑:竺南直

文字编辑:裴 杰

印 刷:北京市顺义兴华印刷厂

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

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:787×1092 1/16 印张:16 字数:410千字

印 次:2008年4月第1次印刷

印 数:4000册 定价:29.00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。

前 言

无线通信是通过电磁波来携带传输信息的，随着无线通信业务的飞速发展，所需要的无线频谱资源越来越多，频谱资源已显得越来越缺乏，当前公认为频谱资源是一种珍贵的稀有资源。为了解决这个问题，人们一直在努力探索充分利用无线频谱资源的各种技术，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。诚然，无线通信可利用的频谱资源受到电波传播特性限制，但除此以外是什么原因导致了相当宽的无线频谱资源变得越来越缺乏呢？

目前的频谱管理主要存在 3 个方面的矛盾情况：频谱使用是动态的，但频谱分配是固定的；频谱是稀有资源，但频谱利用率不高，且存在大量空闲；可分配频谱很少，但无线通信业务量和新技术在快速发展，频谱需要量也在快速增长。

导致这些矛盾的根本原因在于固定分配频谱方案和独占频谱使用权（即业务接入权或频谱准入权）原则，因此有必要改变目前的频谱分配和频谱准入的管理办法，目前 ITU 和 FCC 等无线电法规部门都已开始讨论和研究这个问题。但由于固定频谱分配方案过去在频谱规范管理方面曾发挥过很好的作用，同时存在巨大的经济和政治背景，短期内改变这种状况很困难。

因此，现阶段最实际的办法是通过改变业务接入权或频谱准入权，以开放频谱使用、提高频谱使用效率和充分利用空闲频谱。特别是如果能够将已分配但大量空闲的频谱资源加以合理利用，目前频谱资源的紧张状况将得到极大的改善；在军事通信对抗环境，往往既定的通信传输频段因被敌方干扰或传播环境恶劣而无法通信，必须寻找可以利用的空闲频谱进行通信。这样，迫切需要一种技术来解决开放频谱和提高频谱利用效率问题。

目前已有一些提高频谱利用效率的方法，但不能从根本上解决问题，另外开放频谱必须保护已购买频谱者的利益，同时不能对授权使用该频谱的业务和系统产生严重的干扰，影响它们的正常通信。感知无线电（Cognitive Radio, CR）提供了一种按伺机的方式共享和利用频谱的手段，它可以有效地解决这两个问题。

感知无线电是一种无线电系统，它能够自动地检测周围的环境情况，智能地调整系统的参数以适应环境的变化，在不对授权用户造成干扰的条件下从空间、频率、时间等多维地利用空闲频谱资源进行通信。它区别于其他传统无线电系统的主要特点是：对环境情况的感知能力、对环境变化的自适应性、系统功能模块的可重构性、自主地工作和运行等。

感知无线电技术是无线电发展的一个新里程碑，其应用会带来历史性的变革。对于频谱管制者而言，该技术可以大大提高可用频谱数量，提高频谱利用率，有效利用资源；对于频谱持有者而言，利用该技术可以在不受干扰的前提下开发二级频谱市场，在相同频段上提供不同的服务；对设备厂商而言，该技术可以带来更多的机会，具备感知无线电功能的设备将更具竞争力；对终端用户而言，可以带来更多带宽，在感知无线电技术成熟后，用户则可以享受到单个无线电终端接入多种无线网络的优势；在军事通信方面，根据感知无线电的特点可以“见缝插针”地利用空闲频谱通信，提高通信的可靠性和对抗能力。因此，感知无线电技术必将是未来无线通信的一个重要发展方向，为无线电资源管理和无线接入市场带来新的发展契机和动力。

感知无线电的发展涉及技术、政策、业务、管理、运营等各个方面，本书侧重从技术角

度探讨感知无线电，在总结国内外研究进展的基础上，针对目前已出版著作的不足，并结合作者学习和研究感知无线电技术的体会和成果，集体创作而成。首先系统总结了国内外关于感知无线电技术和应用的研究现状与进展，然后分别讨论感知无线电的空闲频谱感知检测、频谱利用和分享、无线传输方案等关键技术，最后对感知无线电系统的网络结构和测试床、IEEE 802.22 感知无线电系统等进行全面介绍分析。

本书从计划到出版已有两年时间，各种工作一度影响了本书按时推出，但一些新近的研究成果却丰富了本书的内容。在本书的写作过程中，研究生董雪涛、何丽华、周通、黄秋宴、杨黎丽等做了大量的工作，在此向他们表示衷心的感谢。电子工业出版社的竺南直博士对本书出版给予了大力支持和帮助，在此表示诚挚的谢意。本书的出版获通信系统信息控制技术国家重点实验室基金和重庆市自然科学基金资助，在此特别表示感谢。

鉴于时间仓促、作者水平有限，加之感知无线电技术的发展日新月异，书中难免有疏漏甚至不当之处，恳请读者批评指正。

作者

谨识于 2007 年 12 月

目 录

第 1 章 感知无线电概述	1
1.1 感知无线电的发展背景	1
1.1.1 无线频谱现状	1
1.1.2 提高频谱利用率的现有技术方案	4
1.2 感知无线电概念和特点	8
1.2.1 Mitola 提出的感知无线电概念	8
1.2.2 其他感知无线电概念	9
1.2.3 感知无线电的特点	10
1.4 感知无线电的关键技术和功能模块	12
1.5 感知无线电发展现状	14
1.5.1 从事感知无线电技术研究开发的主要机构	14
1.5.2 频谱感知技术发展现状	17
1.5.3 频谱资源管理发展现状	19
1.5.4 感知无线网络与标准发展现状	21
1.6 本书章节安排	24
本章参考文献	25
第 2 章 空闲频谱感知检测技术	29
2.1 概述	29
2.2 主用户发射端检测	32
2.2.1 匹配滤波器检测	32
2.2.2 能量检测	34
2.2.3 循环平稳特征检测	38
2.3 主用户接收端检测	42
2.3.1 本振泄漏功率检测	42
2.3.2 基于干扰温度的检测	43
2.4 协作检测	45
2.5 感知检测技术比较	57
2.6 其他几种频谱检测算法	57
2.6.1 多步频谱检测方法	57
2.6.2 基于 OFDM 的频谱池中空闲频谱的检测	64
2.7 空闲频谱检测中有待于解决的问题	67
本章参考文献	67
第 3 章 频谱管理和频谱共享技术	70
3.1 引言	70
3.2 频谱管理	71

3.2.1	频谱分析	71
3.2.2	信道状态估计和预测模型	72
3.2.3	速率反馈和频谱分析中存在的问题	73
3.2.4	频谱决定	74
3.2.5	频谱管理中有待解决的问题	74
3.3	频谱共享	75
3.3.1	频谱共享概述	75
3.3.2	频谱共享技术分类	77
3.3.3	频谱共享算法	78
3.3.4	频谱共享面临的挑战	87
3.4	DIMSUMnet 项目	89
3.4.1	协调式频谱分配模型	89
3.4.2	协调接入频谱和统计多路接入	90
3.4.3	DIMSUMnet 的网络结构和协调式动态频谱接入的运行机制	91
3.4.4	DIMSUMnet 中的频谱管理和频谱共享	94
3.5	DRiVE/OverDRiVE 项目	101
3.5.1	DRiVE/OverDRiVE 基本介绍	101
3.5.2	DRiVE/OverDRiVE 网络结构	102
3.5.3	DRiVE/OverDRiVE 中的动态频谱分配	104
	本章参考文献	106
第 4 章	感知无线电的传输方案	109
4.1	感知无线电的传输挑战	109
4.2	NC-OFDM 传输技术	112
4.2.1	OFDM 系统简介	113
4.2.2	NC-OFDM 原理及特点	115
4.2.3	NC-OFDM 系统的干扰问题	116
4.2.4	NC-OFDM 系统的信道估计问题	123
4.2.5	NC-OFDM 系统的同步问题	129
4.3	基于 UWB 的传输方案	130
4.3.1	单带 UWB 系统	132
4.3.2	多带 UWB 系统	157
4.4	可重构性与软件无线电	159
	本章参考文献	162
第 5 章	感知无线电系统的网络结构	165
5.1	感知无线网络结构的要求	165
5.2	xG 感知网络结构	167
5.2.1	xG 感知网络结构概述	167
5.2.2	xG 感知网络功能	168

5.2.3	xG 感知网络体系架构	170
5.3	感知网	172
5.3.1	感知网定义	172
5.3.2	感知网的目标	174
5.3.3	感知网实现	176
5.4	xG 测试床	179
5.4.1	测试评估的需求	179
5.4.2	测试评估要求和标准	180
5.4.3	测试实例和结果	181
5.5	CORVUS 测试床	186
5.5.1	CORVUS 基本设计原理	187
5.5.2	系统功能	188
5.5.3	CORVUS 系统性能评估	190
5.6	BEE2 仿真平台	191
5.6.1	BEE2 测试床实现	192
5.6.2	BEE2 设置	195
5.6.3	BEE2 性能评估	197
	本章参考文献	202
第 6 章	IEEE 802.22 感知无线电系统	204
6.1	概述	204
6.2	IEEE 802.22 空中接口	206
6.2.1	IEEE 802.22 无线接入参考模型	206
6.2.2	业务容量和覆盖区域	206
6.2.3	IEEE 802.22 协议	207
6.3	IEEE 802.22 频谱感知方案	210
6.3.1	IEEE 802.22 频谱感知要求	210
6.3.2	IEEE 802.22 频谱感知功能	212
6.3.3	IEEE 802.22 感知测试	218
6.3.4	IEEE 802.22 频谱感知方案	220
6.4	IEEE 802.22 频谱资源共享方案	228
6.4.1	频谱礼仪规则	229
6.4.2	频谱礼仪举例	230
6.4.3	频谱租借和提供	231
6.5	IEEE 802.22 传输方案	235
6.5.1	IEEE 802.22 传输模型和要求	235
6.5.2	OFDMA 符号描述及参数	237
6.5.3	数据速率及初始同步	242
6.5.4	信道编码	244
	本章参考文献	247

第 1 章 感知无线电概述

感知无线电技术是无线电发展的一个新里程碑，其应用会带来历史性的变革。对于频谱管制者而言，该技术可以大大提高可用频谱数量，提高频谱利用率，有效利用资源；对于频谱持有者而言，利用该技术可以在不受干扰的前提下开发二级频谱市场，在相同频段上提供不同的服务；对设备厂商而言，该技术可以为他们带来更多的机会，具备感知无线电功能的设备将更具竞争力；对终端用户而言，可以带来更多带宽，在感知无线电技术成熟后，用户则可以享受到单个无线电终端接入多种无线网络的优势；在军事通信对抗环境，往往既定的通信传输频段因被敌方干扰或传播环境恶劣而无法通信，感知无线电可以寻找空闲的频谱进行通信。虽然由于政策因素和经济利益的限制，感知无线电近几年内市场不会很大，但通过 IEEE 802.22 标准的制订，感知无线电技术对无线网络的发展将产生巨大的推动作用，而对未来的通信业务和市场也带来深远的影响，因此感知无线电技术必将是未来无线通信的一个重要发展方向，为无线电资源管理和无线接入市场带来新的发展契机和动力。

感知无线电的发展涉及技术、政策、业务、管理、运营等各个方面，本章为感知无线电概述，主要讨论感知无线电的发展背景，分析感知无线电概念，归纳感知无线电的特点，阐述感知无线电系统的关键技术和基本功能模块，总结感知无线电研究发展现状。

1.1 感知无线电的发展背景

1.1.1 无线频谱现状

无线通信是通过电磁波来携带传输信息的。一般认为电磁波的频谱是相当宽的，包括红外线、可见光、X 射线等，但作为无线电通信使用的资源，ITU（国际电联）定义了 300GHz 以下的电磁频谱称为无线电磁波的频谱，300GHz 以上电磁频谱的使用正在研究探索之中，它最大不能超过可见光的范围。由于受到电波传播特性、技术和可使用的无线电设备方面的限制，实际上目前使用的较高频段只是在几十 GHz。此外，尽管可以通过频率、时间、地域、码域、空域等相互关联的要素进行频率的多次复用指配来提高频率利用率，但就某一频率或频段而言，在一定的区域、一定的时间、一定的条件之下它是有限的，随着无线通信业务的飞速发展，所需要的无线频谱资源越来越多，当前频谱资源已显得越来越缺乏。因此，公认为无线频谱资源是一种珍贵的稀有资源。除电波传播特性限制外，是什么原因导致了相当宽的无线频谱资源变得越来越缺乏呢？

1. 频率划分和使用政策的约束

由于频谱稀有和避免通信干扰，频谱分配都由专门的无线电法规部门进行统一管理和分配，目前主要按照不同通信业务或者通信系统类型，采用固定（静态）分配频谱原则，得到频谱的团体或个人（通信业务或者通信系统由团体或个人经营）长期独占该频谱使用权。另外，为了保证无线电设备的成本和人们通信的方便，频谱分配方案在全世界或一个国家范

所示^[2]，可以看出少部分频段使用频繁（Heavy use），有些频段部分被使用（Medium use），而大部分频段很少或基本没有使用（Sparse use）。可见频谱利用率不高，大量的频谱处于空闲状态，美国联邦通信委员会（FCC）的研究表明，授权频段的平均利用率范围在 15%~85%之间^[3]。

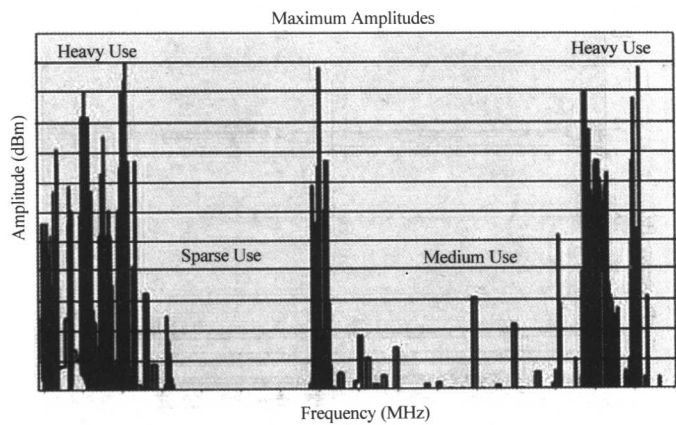


图 1-2 0~6GHz 的频谱利用率情况

3. 频谱使用是动态变化的

与目前固定分配频谱方案和长期独占频谱使用权原则完全不同的是，频谱使用是动态变化的，随着频段、时间、地点和系统（技术）不同而不同。在德国 Lichtenau 对一天中 50MHz~1GHz 的频谱利用情况测量结果如图 1-3 所示^[4]，不同频段的占用情况完全不同。如图 1-4 所示，对 0~1.2GHz 的检测发现，频谱使用在不同时刻会变化，甚至前一分钟与后一分钟都不同。进一步，可以比较不同地点的频谱使用情况也相差很大。

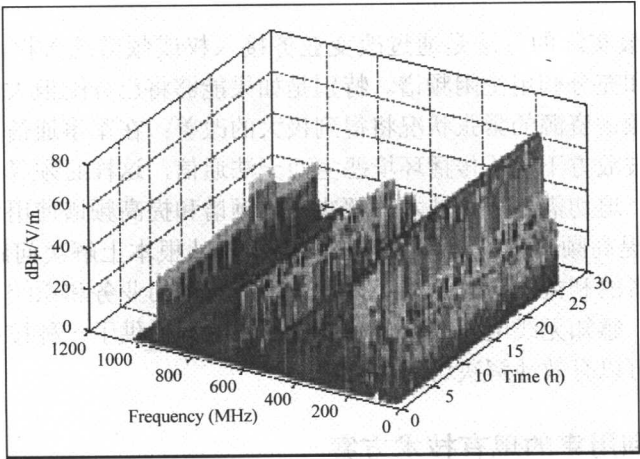


图 1-3 一天中 50MHz~1GHz 的频谱利用情况

4. 问题的原因和解决途径

通过上述分析，目前的频谱管理主要存在三个方面的矛盾情况：频谱使用是动态的，

但频谱分配是固定的；频谱是稀有资源，但频谱利用率不高，且存在大量空闲；可分配频谱很少，但无线通信业务量和新技术在快速发展，频谱需要量非常大。由于新的技术和业务没有频谱可用，或者只能在十分拥挤的无执照频谱通信；即使对那些独占频谱，随着通信业务发展的膨胀、通信标准的发展、通信设备的增多，频谱也很紧张。

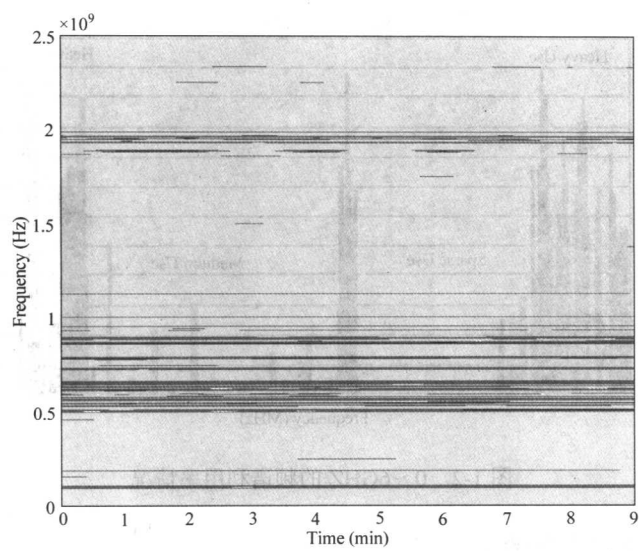


图 1-4 0~1.2GHz 不同时刻频谱使用情况

导致这些矛盾的根本原因在于固定分配频谱方案和独占频谱使用权（即业务接入权或频谱准入权）原则，因此有必要改变目前的频谱分配和频谱准入的管理办法，目前 ITU 和 FCC 等无线电法规部门都已开始讨论和研究这个问题。但由于固定频谱分配方案过去在频谱规范管理方面曾发挥过很好的作用，同时存在巨大的经济和政治背景，短期内改变这种状况很困难。

因此，现阶段最实际的办法是通过改变业务接入权或频谱准入权，以开放频谱使用、提高频谱使用效率和充分利用空闲频谱。特别是如果能够将已分配但大量空闲的频谱资源加以合理利用，目前频谱资源的紧张状况将得到极大的改善；在军事通信对抗环境，往往既定的通信传输频段因被敌方干扰或传播环境恶劣而无法通信，这样必须寻找可以利用的空闲频谱进行通信。这样，迫切需要一种技术来解决开放频谱和提高频谱使用效率问题。

目前已有一些提高频谱使用效率的方法，但不能从根本上解决问题，另外开放频谱必须保护已购买频谱者的利益，同时不能对授权使用该频谱的业务和系统产生严重的干扰，影响它们的正常通信。感知无线电（Cognitive Radio, CR）提供了一种按伺机的方式共享和利用频谱的手段，它可以有效地解决这两个问题。

1.1.2 提高频谱利用率的现有技术方案

根据无线电波的特性，目前已有很多提高频谱利用率的方案[5]~[7]。包括传统的频率、时间、地域复用/再用方案，码域和空域复用/多址方案（由于我们从频谱利用的角度分析问题，以下不区分复用和多址两个概念），高级信号处理技术方案，资源管理和网络结构方案，以及衬垫传输方案等。

1. 频率、时间、地域复用/再用方案

一般频谱资源可以从频段、时间、地点等不同加以区分，由于一个用户的通信不会占用整个传输频带、也不可能一直不停通信、更无法在所有地点都进行通信，这样传统的方法基本从频率、时间、地域复用/再用方面入手。

- 频分复用 (FDM) / 频分多址 (FDMA): FDM/FDMA 方案将信道可用频带按频率划分为若干互不重叠的频段，从而形成许多个子信道，每路信号占其中一个频段，在接收端用适当的滤波器将多路信号分开分别进行解调处理。后来发现只要子带保持正交性而不需要互不重叠就可以了，于是提出了 OFDM/OFDMA 技术，各个子带之间可以有 $1/2$ 的重叠，将频谱利用率提高了近一倍。
- 时分复用 (TDM) / 时分多址 (TDMA): TDM/TDMA 技术将信道的传输时间划分为许多个时隙，每路信号占其中一个或多个时隙传输，在接收端的不同时间段对多路信号分别进行解调处理。与 FDM/FDMA 相比，TDM/TDMA 可以在统一载频上传输多路信号，并通过与数字传输技术结合使频谱利用率有较大提高。
- 蜂窝小区 (Cell): 蜂窝小区是将整个服务区划分为若干小区，每个小区架设一基站负责与小区内所有移动台的无线电通信，使相同频率间隔一定小区 (距离) 可以重新使用，这样利用同频率再用技术提高了通信容量。由于小区形状类似蜂窝形状 (正六边)，所以称为蜂窝小区。很明显频率再用次数越多频谱利用率就越高，于是出现了逐渐减少小区半径的趋势，在早期的宏小区基础上提出了微小区、微微小区组网方法。小区半径越小，组网时需要的基站和传输设备就越多，为了降低组网成本提出了扇区化方案，即将一个蜂窝小区等分为几个扇形 (扇区)，频率再用按扇区为单位进行，这样减少了频率覆盖范围 (相当于减少了小区半径)，从而可以增大频率再用次数。目前，两种方案都在采用，微小区和微微小区在覆盖效果方面具有优势，扇区化在组网成本方面具有优势。

2. 码域和空域复用/多址方案

随着对无线电波的特性研究的深入，除最基本的从频段、时间、地点等不同加以区分外，还可以从码域和空域等复用/多址方面来充分利用无线电频率。

- 码分复用 (CDM) / 多址 (CDMA): 在 CDM/CDMA 系统中，不同用户传输信息所用的信号不是靠频率不同或时隙不同来区分的，而是用各自不同的编码序列来区分，或者说根据码型结构的不同来实现不同信号的分割。与 FDM 和 TDM 完全不同，它允许所有用户在同一时间使用整个信道/频率进行数据传送，通过与扩频技术结合，并采用先进的语音激活与检测技术等，可以极大地提高频谱利用率。
- 智能天线 (SA): 智能天线是采用数字波束成型技术的自适应天线阵，天线阵中各阵元通过自适应波束成型网络自适应调整加权值，自适应改变天线方向图，形成若干个自适应波束，达到根据噪声、干扰、多径和位置情况自适应跟踪多个用户的目的。它利用在信号入射方向上的差别，将同频率、同时隙、同码道的信号在空域区分开来，实现基于方向的空分复用 (SDM) / 空分多址 (SDMA)，所以它可以成倍地扩展通信容量，并和其他复用/多址技术相结合，最大限度地利用有限的频谱资源。
- MIMO 技术: MIMO 技术可以利用发射端和接收端配置的多个天线形成多个并行传输的空间信道 (即 MIMO 信道)。根据信息论结果，MIMO 信道的容量随着天线数量

的增大而线性增大，也就是说可以利用 MIMO 信道成倍地提高无线信道容量，在不增加带宽和天线发送功率的情况下，频谱利用率可以成倍地提高。

3. 高级信号处理技术方案

利用高级信号处理技术提高信道/频谱利用率可以从发射端和接收端两方面来探讨。从发射端来看，减少或压缩传输的信息就可以一定程度提高信道/频谱利用率；从接收端来考虑，按照信道容量理论，将无线通信传输中的衰落、干扰减少或者降低接收检测门限就可以一定程度提高信道/频谱利用率。目前该领域的方法很多，一些典型的方案包括：

- 压缩编码技术：数据压缩的目的是在保证一定质量要求的条件下，以最小的数据量来表达和传输数据。它利用原始数据的统计特性，解除信源的相关性，去掉信源多余的冗余信息，使需要传输的数据量减少。与没有经过压缩的数据传输相比，它提高了传输信息的效率，这等效于提高了信道/频谱利用率。
- 自适应编码调制（AMC）技术：提高调制阶数和减少信道编码码率都允许在同样的带宽传输更多的数据，但是这会牺牲部分传输质量。信道容量与信道质量有关，AMC 技术的本质是根据信道的情况确定当前信道的容量，根据容量确定合适的调制方式和编码方式，以便最大限度地发送信息，而且针对每一个用户的信道质量变化，能提供可相应变化的调制编码方案以适应。从而，AMC 技术可提供高速率传输和高频谱利用率。
- 分集技术：分集技术是一种重要的抗衰落与干扰的技术，在随机时变复信道中，增加传输可靠性等价于增加分集重数。分集技术包括分集发送与分集接收。分集发送技术主要有迟延分集发送、正交分集发送、时间交换的分集发送和空时编码技术等，分集发送不仅能抗衰落，也能利用多天线发送特点极大地提高传输速率或容量。分集接收技术按分集的目的有宏分集与微分集，宏分集用于抗慢衰落，微分集用于抗快衰落。由于快衰落是移动通信的最大挑战，因此微分集就是通常所指的分集技术，主要包括空间分集（含角度分集、极化分集）、频率分集、时间分集（含多径分集）。
- 自适应均衡技术：由于无线通信信道是一个随机时变的信道，其传输特性很不理想，信号经过无线通信信道传输会产生扩展失真，引起符号间干扰（ISI），对这种不理想传输特性进行校正以降低或消除 ISI 的电路称为均衡器。自适应均衡器能够根据信道传输特性的变化自动调整参数以尽可能实现最佳的均衡效果。自适应均衡适合于多径信号不可分离的条件下，且迟延扩展远大于符号持续时间的情况。
- 多用户检测（MUD）：CDMA 系统的干扰受限特征与其他多址方式比较而言尤为突出，其干扰主要来源于多址干扰（MAI）。针对某一用户进行信号检测而将其他的用户作为噪声加以处理的单用户检测，其结果导致了信噪比恶化，系统性能和容量不尽如人意。为了提高 CDMA 系统容量，人们探索将其他用户的信息联合加以利用，多个用户同时检测的多用户检测技术。MUD 包括联合检测（JD）和干扰抵消（IC），联合检测（JD）的性能优于干扰抵消（IC），但 JD 的复杂度高于 IC。联合检测（JD）的基本思想是利用所有用户的相关先验信息，在一步之内将所有用户的信号分离出来，理论上 JD 可以完全消除 MAI 的影响。联合传输（JT）是一种适合 CDMA 多用户系统的预处理技术，它将接收端的数据检测搬移到发射端来，将发送信号在基站进行预滤波，消除 ISI 和 MAI，然后判决传输信号，通过信道后由移动台利用简单的匹配滤波

接收自己的信号，它克服了 JD 复杂度高的问题，由于不用为信道估计分配资源，还可以提高系统容量。

- 盲信号处理 (BSP): 盲信号处理^[8]是人工神经网络、统计信号处理、信息理论相结合的产物，它针对传感器检测的混合信号 (或观测数据)，在源信号未知、信号传输通道特性未知的情况下，仅通过分析观测数据来获得源信号及信号传输通道特性。盲信号处理技术原则上不利用任何训练数据，也没有关于信道的卷积、滤波、混合系统参数的先验知识，因此它与非盲处理相比节约传输信道资源。

4. 资源管理和网络结构方案

前面的方案主要是物理层技术，无线通信系统的资源管理和网络结构方案也对信道/频谱利用率有较大影响。

- 动态无线资源管理：为了提高传输的效率，无线通信系统一般要求无线资源共享。无线资源管理就是在网络业务分布不均匀、信道特性不稳定等情况下，灵活调配和动态调整可用无线资源，尽量提高信道/频谱利用率，防止网络拥塞和保持尽可能小的信令开销。在 FDMA 中，资源的概念是一固定的频率带宽；在 TDMA 中，是一帧中特定的时隙；在 CDMA 中则是某一类特殊的编码。通过动态无线资源管理，可以将无线通信系统中宝贵的无线资源合理分配和最佳利用。
- 功率控制：功率控制就是控制发射端的发射功率，减少系统的同道干扰和小区间干扰、克服补偿无线信道的衰落，进而最大化系统容量。对于上行信道，功率控制的关键在于如何有效地跟踪信号衰落使得到达接收机的各信号功率相等；对于下行信道，功率控制要在保证移动台能满足接收信号载干比要求的功率电平下，尽量降低对系统内其他用户和相邻小区的干扰。功率控制策略包括开环功率控制、闭环功率控制和外环功率控制。开环功率控制不需要反馈信息，主要用于接入和连接建立过程；闭环功率控制需要发射和接收双方共同参与，接收方将接收信号质量的测量情况反馈给发射方，使发射方可以更准确地确定发射功率；外环功率控制的作用是设置快速功率控制的目标值，以保证通信质量。
- Ad Hoc 网络：无线 Ad Hoc 网络^[9]是一种没有固定中心实体的自组织网络，依靠节点间的相互协作在复杂多变的无线环境自行成网，借助于多跳转发技术来弥补传输距离和覆盖范围的不足。由于自组织特点，无线 Ad Hoc 网络提高了网络的灵活性和可靠性；由于对等网络特点，无线 Ad Hoc 网络可以避免中心节点容量受限，使网络总的吞吐量增加；由于多跳特点，无线 Ad Hoc 网络增强了网络的扩展性，而由于每一单跳小范围传输降低了传输中的能量消耗。

5. 衬垫传输方案

什么是衬垫 (Underlay) 传输方案现在还没有正式定义。我们认为，所谓衬垫传输方案就是发送信号以很低的功率传输，与其他信号同时处于同一环境 (频域、地域等) 而不被破坏。对于其他信号，衬垫传输信号好像衬垫于自己下面的噪声；对于衬垫传输信号，它采用共享的方式与其他信号和平共处而不被干扰破坏。根据这个定义，目前可以看作衬垫传输方案的主要有两种：超宽带 (UWB) 传输技术^[10]和扩频 (SS) 传输技术。

- 超宽带 (UWB) 技术：UWB 不采用传统的正弦载波，而是直接利用纳秒级的非正弦波脉冲传输数据，所占的频谱范围很宽，可达数 GHz。由信道容量的香农公式，

UWB 系统可以在信噪比很低的情况下工作, 几乎被淹没在各种电磁干扰和噪声中; 同时, UWB 信号的传输速率高, 可达几十 Mbps 至数 Gbps; UWB 通信系统无需中频处理, 采用几乎全数字硬件结构, 使得 UWB 通信系统可以做到低成本、易维护, 且易向 CMOS 集成; UWB 发射脉冲持续时间远小于脉冲重复周期, 平均发射功率很低, 使 UWB 技术在实现超宽带信号高传输数据率的同时也有着低功耗的显著优点。

- 扩频 (SS) 技术: 扩频技术是把信息的频谱展宽进行传输的信息传输方式, 其信号所占有的频带宽度远大于所传信息需要的最小带宽。频带的扩展是通过一个独立的码序列来完成, 用编码及调制的方法来实现的, 与所传信息数据无关, 在接收端则用同样的码进行相关同步接收、解扩及恢复所传信息数据。扩频信号与普通数字信号相比, 有伪随机和类似噪声的特性; 在扩频通信系统中, 许多用户的信号可以在同一频带中传输。SS 技术除固有的抗干扰、保密能力外, 易于重复使用频率外, 其频谱利用率也很高。

上面的传输方案在一定程度上提高了传输容量和频谱利用率, 即便如此, 目前的容量问题和频率资源问题仍很突出, 采用感知无线电技术还可以进一步改进频谱利用率。感知无线电技术本质上是一种叠加 (Overlay) 方案, 它利用法定无线通信系统的空闲资源, 在对法定无线通信系统不造成严重干扰的情况下共存, 并可以与上面讨论的各种传输方案协调工作, 对现有的通信体制和频谱管理政策不构成冲突, 是一种近期可行的技术方案。

1.2 感知无线电概念和特点

由于感知无线电技术是一个全新的技术路线, 涉及的技术领域很多, 应用的场合很广, 可以从不同领域不同应用场合对感知无线电技术进行认识, 因此在其发展过程中存在多种观点, 下面将对一些主要观点或定义进行分析探讨, 由此, 可以从不同角度和不同特点更深入了解感知无线电技术。

1.2.1 Mitola 提出的感知无线电概念

感知无线电 (Cognitive Radio, CR) 概念是由瑞典 Joseph Mitola 博士于 1999 年提出的^[11], 在[11]中定义感知无线电为一种采用基于模式的推理达到特定无线相关要求的无线电。Mitola 博士认为感知无线电是这样通过一种无线电知识描述语言 (Radio Knowledge Representation Language, RKRL) 来提高个人无线通信业务的灵活性, 以及 RKRL 采用基于模式的推理方式与网络进行智能交流实现对无线电“黑盒”的智能感知。其中, 基于模式的推理和无线电知识描述语言 (RKRL) 是 Mitola 博士强调的核心。

Mitola 博士也是软件无线电 (Software Radio, SR) 思想的发明人^[12], 他认为感知无线电 (CR) 是软件无线电 (SR) 的特殊扩展, 以模式为基础进行有关用户和环境的推理。这样, 可以说感知无线电将使软件无线电从预置程序的盲目执行者转变成为无线电领域的智能代理, 且软件无线电又是感知无线电实现的理想平台。

Mitola 在其博士论文[13]中给出了以通信前后环境和位置为基础的感知周期。如图 1-5 所示, 感知周期描述了感知无线电系统如何与环境 (Outside world) 进行信息交互, 利用感知的新状态 (New states) 和先验信息 (Prior states), 最终得到响应的一个感知无线电持续

的观察（Observe）、自身定位（Orient）、制订计划（Plan）、学习（Learn）、决策（Decide）并执行（Act）的流程。

学习是观察、计划和决策阶段的功能函数，以前的决策结果可以作为将来的先验信息。计划阶段进行对偶然事件的推理，决策阶段从候选计划中做出最合适的选择，执行阶段触动选中的程序。正常（Normal）情况下，先计划、后决策、再执行，紧急（Urgent）情况下可以省略计划过程，而在即刻（Immediate）情况下可以直接执行。感知周期将最终结果翻译成逻辑输出，送至传统的软件无线电，启动在特定时间内占据特定无线资源的任务。

Mitola 提出的感知无线电中，在作出改变运行参数的结构的时候，无线节点和网络观察到的每一个可能参数都被考虑到，所以这种感知无线电称为“全感知无线电”，即“认知无线电”，然而至今为止这样的认知无线电还没有实现过。正如为了发展理想的软件无线电（SR）需要经过基本的软件定义无线电（SDR）发展阶段一样，目前的研究和开发主要集中在对授权用户不造成干扰的情况下，伺机动态接入可用的空闲频谱并进行通信的“感知无线电”，有些文献也称为“动态频谱接入（DSA）无线电”^[14]、“机会频谱接入（OSA）无线电”^[15]或者“频谱感知无线电（SSCR）”^[16]，因此本书主要讨论这种感知无线电技术及其应用。

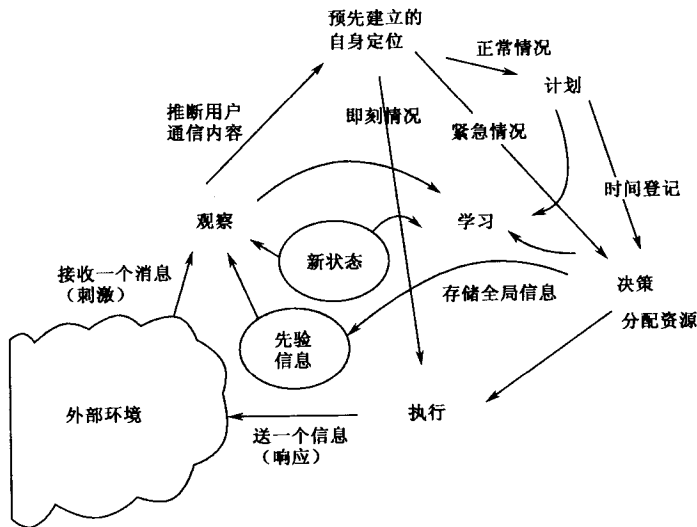


图 1-5 感知无线电的感知周期

1.2.2 其他感知无线电概念

1. FCC/IEEE/ITU/SDR 论坛等组织的感知无线电概念

美国 FCC 于 2003 年给出了一种感知无线电的定义^[17]。感知无线电是无线终端利用与周围无线电磁环境进行交互所获取的无线背景知识，调整传输参数，实现无线传输的能力。这样，只要具备自适应环境感知探测，并且能够动态调整传输频点和相关传输参数的设备就是感知无线电设备，但感知无线电最大的特点在于智能性，也是它与普通软件定义无线电最大的不同。