



国际信息工程先进技术译丛

WILEY

认知无线电通信与组网： 原理与应用

COGNITIVE RADIO COMMUNICATIONS AND
NETWORKING - PRINCIPLES AND PRACTICE

Robert C. Qiu

Zhen Hu

(美)

Husheng Li

编著

Michael C. Wicks

郎为民 张国峰 张锋军 陈红 等译

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际信息工程先进技术译丛

认知无线电通信与组网： 原理与应用

(美) Robert C. Qiu Zhen Hu 编著
Husheng Li Michael C. Wicks
郎为民 张国峰 张锋军 陈红 等译

机械工业出版社

本书紧紧围绕认知无线电发展过程中的热点问题,以认知无线电理论、技术与应用为核心,比较全面和系统地介绍了认知无线电技术的基本原理和应用实践的最新成果。全书共分为12章,分为理论、技术与应用3个部分。理论部分包括大维随机矩阵、凸优化、机器学习、博弈论等内容;技术部分包括频谱感知(基础技术、经典检测、非交换随机矩阵的假设检验)、多输入多输出(MIMO)和正交频分复用(OFDM)等内容;应用部分包括认知无线网络和认知无线电传感器网络等内容。本书全面介绍了与认知无线电有关的基本数学工具,描述了认知无线电的基础知识,演示了从理论到实践的诸多实例,并列出了可供课外阅读的大量参考文献。本书材料权威丰富,体系科学完整,内容新颖翔实,知识系统全面,行文通俗易懂,兼备知识性、系统性、可读性、实用性和指导性。

本书可作为无线通信运营商、网络运营商、应用开发人员、技术经理和电信管理人员的技术参考书或培训教材,也可作为高等院校通信与信息系统专业的高年级本科生或研究生的教材。

Copy © 2012 John Wiley and Sons Ltd.

All Rights Reserved. This translation published under license.

Authorized translation from the English language edition, Cognitive Radio Communications and Networking Principles and Practice, ISBN 978-0-47097-209-0, Robert C. Qiu, Zhen Hu, Hu Sheng Li, Michael C. Wicks, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书原版由 Wiley 公司出版,并经授权翻译出版,版权所有,侵权必究。

本书中文简体翻译出版授权机械工业出版社独家出版,并限定在中国大陆地区销售,未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

本书封面贴有 Wiley 公司的防伪标签,无标签者不得销售。

本书版权登记号:图字 01-2013-2606 号。

图书在版编目(CIP)数据

认知无线电通信与组网:原理与应用/(美)李虎生(Husheng Li)等编著;
郎为民等译. —北京:机械工业出版社,2013.10

书名原文:Cognitive radio communications and networking-principles and practice
(国际信息工程先进技术译丛)

ISBN 978-7-111-43741-3

I. ①认… II. ①李…②郎… III. ①无线电通信-通信网 IV. ①TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 196932 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:张俊红 责任编辑:赵任

版式设计:霍永明 责任校对:刘怡丹

封面设计:赵颖喆 责任印制:李洋

中国农业出版社印刷厂印刷

2013 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

169 mm × 239 mm · 25 印张 · 558 千字

0001—2500 册

标准书号:ISBN 978-7-111-43741-3

定价:99.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面防伪标均为盗版

译者序

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高效利用的历史。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,并不能从根本上解决频谱资源紧缺的问题。随着未来无线通信宽带化的发展趋势,物联网、云计算、移动互联网等新技术、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,频谱资源存在巨大的“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,因而被预言为未来最热门的无线技术之一。

认知无线电技术是无线通信发展过程中的一个新的里程碑,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。

在这种背景下,为促进我国认知无线电技术的发展和演进,在国家自然科学基金项目“节能无线认知传感器网络协同频谱感知安全研究”(编号:61100240)和国防信息学院预先研究项目资金的支持下,结合自己多年来在无线通信技术领域的研究成果和经验,笔者特翻译此外文原著,以期抛砖引玉,为我国无线通信的发展尽一份微薄之力。

本书对认知无线电理论、技术与应用进行了全面系统的介绍,共分为12章,涉及引言、频谱感知基础技术、经典检测、非交换随机矩阵的假设检验、大维随机矩阵、凸优化、机器学习、多输入多输出(MIMO)、正交频分复用(OFDM)、博弈论、认知无线网络和认知无线电传感器网络等内容。本书全面介绍了与认知无线电有关的基本数学工具,描述了认知无线电的基础知识,演示了从理论到实践的诸多实例,并列出了可供课外阅读的大量参考文献。

本书由郎为民、张国峰、张锋军、陈红等翻译,解放军国防信息学院的刘建国、苏泽友、钟京立、刘勇、王卉、夏白桦、蔡理金、毛炳文、靳焰、王逢东、任殿龙、刘素清、邹祥福、李建军、陈于平、瞿连政、徐延军、高泳洪、胡东华、孙月光、孙

少兰参与了本书部分章节的翻译工作，李海燕、马同兵、胡喜飞、余亮琴、王会涛、张丽红、于海燕绘制了本书的全部图表。和湘、郑红艳、王大鹏、李官敏、陈林、王昊对本书的初稿进行了审校，并更正了不少错误。在此一并向他们表示衷心的感谢。同时，本书是译者在尽量忠实于原书的基础上翻译而成的，书中的意见和观点并不代表译者本人及所在单位的意见和观点。

感谢本书原作者之一、我的导师——李虎生教授。在田纳西大学电子工程与计算机科学系留学期间，李教授渊博的专业知识、严谨的治学态度、精益求精的工作作风、诲人不倦的高尚师德令我受益匪浅。同时也要感谢本书原作者之一——田纳西理工大学的邱才明教授，作为李教授的挚友，邱教授像指导自己学生一样指导我，令我在认知无线电领域的研究能力突飞猛进。

机械工业出版社的张俊红老师作为本书的策划编辑，为本书的出版付出了辛勤的劳动，机械工业出版社对本书的出版给予了大力支持，在此一并表示感谢。同时需要特别说明的是，本书英文原版书的最后列出了大量的英文参考文献，达1475个之多，为了给中文版图书合理“瘦身”以减轻读者之负担，尤其是为了更加方便读者参考查阅，机械工业出版社专门把这些英文参考文献做成了电子版文件，有需要的读者可通过电子邮件 buptzjh@163.com 与本书编辑联系。希望我们的这个尝试，能为读者的阅读带来更多方便。

由于认知无线电技术还在不断完善和深化发展之中，新的标准和应用不断涌现，加之译者水平有限，翻译时间仓促，因而本书翻译中的错漏之处在所难免，恳请各位专家和读者不吝指出。

谨以此书献给我聪明漂亮、温柔贤惠的老婆焦巧，以及活泼可爱、机灵过人的宝贝郎子程！

郎为民

2013年初秋于武汉

原书前言

写这本书的想法至少始于5年前，当时第一作者正在讲授与通信/无线通信有关的一年级研究生课程。课程结束后，一些学生在开始其博士（Doctor of Philosophy, PhD）研究之前，继续学习前沿课题（如凸优化）。硕士生（Master Student, MS）在开始设计无线系统之前，想知道更多与该领域有关的知识。第一作者定期讲授这些高级课程，其中的一部分材料为本书提供了起点。当本书项目开始后，其他作者加入，使得我们能够满足最后期限要求，并在课题结题之前出版。本书的另一个题名可以是高级无线通信。

最困难的部分是要决定放弃哪些内容。经过20年的增长，无线行业还在迅速扩大。在他的大学时代，第一作者研究了第二代（Second Generation, 2G）系统——码分多址（Code Division Multiple Access, CDMA）和全球移动通信系统（Global System for Mobile Communication, GSM）。现在，3G（WCDMA）和4G（LTE）系统都已可用。每个系统都有其核心概念，并要求独特的分析技能。一般来说，教授们发现，他们最重要的职责是向学生传授所需的最难的数学工具，来分析和设计基本系统概念。例如，在GSM（TDMA）系统中，均衡器是系统的核心。对于CDMA系统来说，RAKE接收机是核心（功率控制也是）。对于长期演进（Long Term Evolution, LTE）系统来说，多输入多输出（Multiple Input Multiple Output, MIMO）系统与正交频分复用（Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM）是核心。

我们这本书中就采用了这种方法。书中涵盖了下一代认知无线网络（Cognitive Radio Network, CRN）的核心系统概念。我们认为以下三种分析工具是CRN的核心：①大维随机矩阵；②凸优化；③博弈论。统一的视图是所谓的“大数据”——高维数据处理。由于认知无线电的独特性质，我们面临着无可比拟的挑战——需要处置的数据太多。在当前的数字化时代，实时搞清数据的意思不仅是像Facebook、谷歌和亚马逊等主要参与者的核心，而且也是我们电信供应商的核心。但是，要成功地解决大数据问题，仍然存在许多障碍。一方面，当前的工具是不够的。具备数据分析技能的科学家和工程师也是稀缺的。未来电子与计算机工程（Electrical and Computer Engineering, ECE）学生必须学会从研究大数据中获得的分析技能。除了传统领域，这本书还包含了来自多学科领域（机器学习、金融工程、统计学、量子计算等）的结果。社交网络和智能电网需要更多的资源。研究人员必须变得更具成本意识。上面提到的其他领域的投资可以降低解决这些问题的成本。抽象的数学连接是实现这一目标的最佳切

入点。这证明了我们教给学生在离校后不易学到的最难的的分析技能的理念是合理的。通过本书的学习，有实际经验的工程师将理解系统的概念，并可能与其他领域联系起来。同行的研究人员可以将本书作为参考书。

与以前的系统相比，认知无线网络（CRN）包含高度可编程的无线电设备，其调制波形迅速发生变化，其频率更加敏捷，其射频（Radio Frequency, RF）前端使用的是宽带（高达几GHz）。除了物理层功能的高度可编程性质之外，CRN无线电使用前所未有的低信噪比（Signal to Noise Ratio, SNR），对频谱进行感知（例如，采用美国通信委员会所要求的-21dB）。为了支持这种基本的频谱感知功能，系统分配计算资源，最终目标是达成实时运算。从另一个角度来看，无线电设备是一款功能强大的传感器，具有几乎无限的计算和组网能力。将这两种观点结合起来，可以把通信和传感合并成一个功能，它可以发射、接收和处理可编程调制波形。实时分布式计算被嵌入到这两种功能之中。

我们认为，缺乏一种对众多应用都适用的一致网络理论。相反，当前网络是针对特殊需求而设计的，当新需求出现时，必须重新设计网络。由于缺乏网络理论，因而导致了成本的浪费。认知无线网络为组网领域带来了独特的挑战。

无线技术正在迅速增值，无处不在的无线计算、通信、传感和控制的愿景提供了许多社会和个人利益的承诺。认知无线电通过动态频谱接入，提供的是一种颠覆性技术的承诺。

认知无线电是完全可编程的无线设备，它可以：①感知其环境；②动态调整其传输波形、信道接入方式、频谱使用和组网协议。预计认知无线电技术将成为一种通用可编程无线电，可充当无线系统开发的通用平台，与微处理器在计算中发挥的作用类似。然而，在拥有一台灵活的认知无线电、一个有效的构成模块和能够动态优化频谱使用的认知无线网络大规模部署之间还存在着很大差距。试验平台是至关重要的，但被完全忽略了，因为在本书出版时，材料已经变得过时。我们将重点关注持续有效的材料。

本书的目标之一是研究大规模认知无线网络。特别是，我们需要研究使用量子信息和机器学习技术的新型认知算法，来将现场可编程门阵列（Field Programmable Gate Array, FPGA）、中央处理器（Central Processing Unit, CPU）和图形处理单元（Graphics Processor Unit, GPU）技术集成到当前的无线电平台中去，并在现实世界大学环境中部署这些网络作为试验平台。我们的应用范围包含从通信到雷达/传感和智能电网技术等领域。由于无人机的高度移动性，因而针对无人机（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）的认知无线电组网/传感也非常有趣，且非常具有挑战性。同步是至关重要的。无人机可以由机器人来替代。

一项任务将推行一个把CRN看作是传感器的新举措，并探索基于认知无线网络

的军民两用传感/通信系统的愿景。动机是推动传感系统和通信系统融合成统一的认知组网系统。认知无线网络是一种集成了控制、通信和计算能力的信息物理系统。

由于认知无线网络中的协同频谱感知嵌入式功能，因而可以获得与无线电环境相关的丰富信息。CRN 的独特信息可用于在 CRN 覆盖区域内检测、显示、识别或跟踪目标或入侵者。这种信息系统的本质上是高维和随机的。因此，在新举措中，我们可以采用量子探测、量子状态估计、量子信息论，将 CRN 作为传感器。采用这种方式，可以提高 CRN 的感知能力，大大改善网络性能。

人们往往认为认知无线电具有两项基本功能：①频谱感知；②频谱感知资源分配。在第二项功能中，凸优化起到了核心的作用。优化源于人类的本能。我们总是喜欢以最好的方式完成某件事情。优化理论为我们提供了一种实现人类本能的方式。随着计算能力的增强，优化理论（尤其是凸优化）是一种用于处理大数据的、功能强大的信号处理工具。如果可以将数据挖掘问题看作是一个凸优化问题，则可以实现全局最优。结果或性能是毫无疑问的。但是，确保优化算法在上百万甚至上万亿元素的数据集上具有可扩展性，仍然是一个挑战。因此，在我们获得优化理论的效益之前，需要人们进一步研究优化理论。

我们对节点的集合进行了研究。这些节点（与人类相似）既可以合作，又可以竞争。博弈论抓住了资源竞争的基础性作用。当然，可以将博弈论中的许多算法归结为凸优化问题。对于 CRN 中的博弈论来说，我们已经提供了一般博弈论的大量工作知识，使得读者不需要阅读与博弈论相关的具体书籍，即可开展研究。我们给出了 CRN 中的几个典型实例，来说明如何使用博弈论来分析认知无线电。此外，我们还解释了认知无线电中博弈论的许多独特问题，以激发新的研究方向。

我们将采用逐层的方式来解释 CRN 中的组网问题。我们解释了仅与 CRN 相关的特定挑战，以区别于传统的通信网络。我们希望，对应的章节不仅解释了 CRN 的现状，而且还能激发 CRN 的新型设计思路。

本书的概貌如图 P-1 所示。CRN 的新型应用包括：

- 1) 智能电网，安全性是一大挑战。
- 2) 无人机的无线组网，同步是一大挑战。
- 3) 云计算与 CRN 的集成。
- 4) 可将 CRN 用于分布式感知。

本书共包含 12 章。

第 1 章是本书的综述。

第 2 章介绍了频谱感知的基础技术。这些技术可以在当前的系统中实现。能量检测是基础。基于二阶统计量的检测是非常重要的。也可使用奇异值分解（Singular Value Decomposition, SVD）来提取特征。循环平稳检测用于处理完整性。

第3章是频谱感知的核心。它也是理解第4章新算法的基础。广义似然比检验 (Generalized Likelihood Ratio Test, GLRT) 是整个第3章的核心。我们重点关注三种主要分析工具：①多元正态分布统计；②属于随机矩阵的样本协方差矩阵；③广义似然比检验 (GLRT)。本章也为我们学习第5章 (大维随机矩阵) 做好了准备。

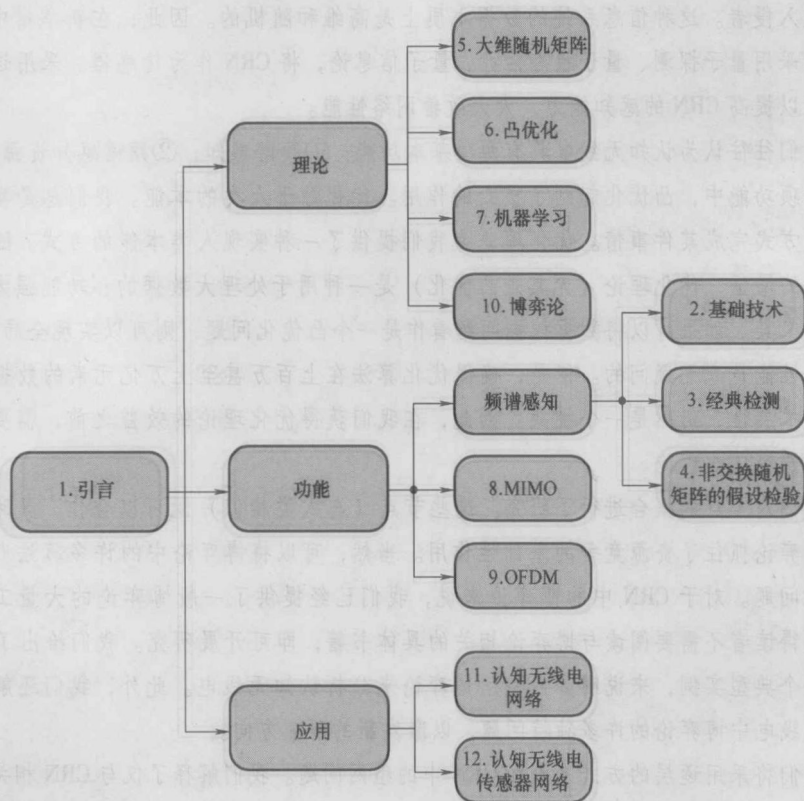


图 P-1 本书各章之间的关系

第4章研究了非交换随机矩阵及其检测。本章的本质是探索性的。它将我们与量子计算、应用线性代数和机器学习方面的一些最新文献联系起来。基本的数学对象是随机矩阵——矩阵值随机变量，它们是诸如 C^* 代数的代数空间中的元素。本章设计的目的不仅具有现实意义，而且还有概念意义。当我们处理机器学习中的大数据时，这些概念是基本的。我们处理了大量随机矩阵。与第3章中涉及的经典算法相比，新算法能够实现更好的性能。

第5章非常长。但是，它甚至没有包含在最初的创作中。在本书项目的最后阶段，我们充分认识到它在我们大数据的统一视图中的根本意义。在第4章中，我们建立的基本数学对象是协方差矩阵及其相关的样本协方差矩阵。我们可以根据数据渐近地估计前者。最近的发展趋势却是使用非渐近样本协方差矩阵。数据是海量的，但不是无限的。核心困难来自于样本协方差矩阵的随机性，该矩阵使用了有限数据样本。当对

这些样本协方差矩阵的大集合进行研究时，需要用到所谓的随机矩阵理论。另外，量子信息对于检测是必要的。在这种背景下，当使用量子检测时，用到了第4章的有关知识。早在1999年，Tse和Verdu就在无线通信中使用大维随机矩阵来研究CDMA系统。后来，大维随机矩阵被用于研究MIMO系统。它们对我们的通信与传感融合愿景尤为关键。大维随机矩阵是用于收集内在（量子）信息的理想数学对象，这些信息来自于能够感知、计算和推理的认知节点的大型网络。为了研究这个大维随机矩阵的集合，需要用到所谓的随机矩阵理论。本章阐明了如何在大型传感网络中应用随机矩阵理论（也可参见第12章）。在编写本书时，如何将该理论应用于诸如路由、物理层优化等跨层应用仍然是难以捉摸的，是仅适用本章的另一个基本概念，全面研究超出了我们的范围。我们重点指出了压缩感知的相关性。压缩感知利用物理信号的稀疏结构，大维随机矩阵利用随机项的结构。不知何故人们认为两种理论必须结合在一起。针对这个问题，我们只触及到表面，仍需要进一步地开展研究。

第6章将给出优化理论的一些背景信息。优化源于人类的本能。我们总是喜欢以最好的方式来完成一些事情。依托数学，可以将人类的本能记录下来。凸优化是优化理论的一个子域。凸优化的优势在于如果存在一个局部最小值，则它就是全局最小值。因此，如果实际问题可归结为凸优化问题，则可以得到全局最优值。这也是凸优化近年来变得流行的原因。本章涵盖了线性规划、二次规划、几何规划、拉格朗日对偶、优化算法、鲁棒优化和多目标优化等内容，并将介绍一些实例，来展现优化理论的优势和效益。

第7章将提供机器学习的一些背景资料。机器学习可以使系统变得更加智能。为了给读者提供机器学习的概貌，本章几乎涵盖了与机器学习相关的所有主题，其中包括无监督学习、监督学习、半监督学习、直推、迁移学习、主动学习、强化学习、基于核的学习、降维、集合学习、元学习、卡尔曼滤波、粒子滤波、协同滤波、贝叶斯网络等。机器学习是认知无线网络的基本引擎。

第8章将介绍MIMO传输技术。无线通信中的MIMO利用发射端和接收端的多副天线，以提高无线通信性能，而无须额外的无线带宽。可以实现阵列增益、分集增益和复用增益。本章涵盖了空时编码、多用户MIMO、MIMO网络等内容。MIMO可以使用空间无线资源来支持认知无线网络中的频谱接入和频谱共享。

第9章介绍了OFDM传输技术。OFDM是一种基于多载波调制的数字数据传输技术。本章讨论了包括OFDM实现、同步、信道估计、峰值功率问题、自适应传输、频谱成形、正交频分复用多址（Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access, OFDMA）等在内的OFDM系统关键问题。频谱接入和频谱共享也可以在OFDM认知无线网络中得到很好的支持。

第10章专门介绍了博弈论在认知无线电中的应用。频谱中存在着竞争和合作，从而导致了认知无线电中的各种博弈。在本书中，我们将对博弈论进行简要的介绍，然后将其应用到认知无线电的几种典型博弈类型中去。

第11章对认知无线电组网设计问题进行了系统介绍。我们将对认知无线网络各层中的算法和协议进行解释。特别是，我们将提到认知无线电机制带来的独特挑战。

我们还将讨论认知无线网络中的复杂网络现象。

第12章将描述一个认知无线电传感器网络的新举措。这一构想试图探索基于认知无线网络的军民两用传感/通信系统的愿景。认知无线网络是一种集成了控制、通信和计算能力的信息物理系统。认知无线网络可以为下一代情报、监视和侦察系统提供信息高速公路和强有力的支撑。本章将对认知无线电传感器网络中的开放问题和潜在应用进行研究。

作者邱才明教授要感谢他的博士毕业生在校对时提供的帮助，他们是田纳西理工大学 (Tennessee Tech University, TTU) 的 Jason Bonier、Shujie Hou、Xia Li、Feng Lin 和 Changchun Zhang，尤其是 Changchun Zhang 绘制了大量的图形。Qiu 和 Hu 还要感谢他们在 TTU 的同事——Kenneth Currie、Nan Terry Guo 和 P. K. Rajan 多年的帮助。Qiu 和 Hu 要感谢他们的项目总监——海军研究办公室 (ONR) 的 Santanu K. Das 博士对本书中各项研究的支持。此项研究工作得到了两项美国国家自然科学基金项目 (ECCS-0901420 和 ECCS-0821658) 以及海军研究办公室 (ONR) 两大项目 (N00010-10-1-0810 和 N00014-11-1-0006) 资助。作者们想感谢编辑 Mark Hammond 在整个书籍编写过程中给予的鼓励。作者们每天都会得到来自其他编辑的帮助：最初是 Sophia Travis 和 Sarah Tilley，之后是 Susan Barclay。

目 录

译者序

原书前言

第1章 引言	1
1.1 愿景：“大数据”	1
1.2 认知无线电：系统概念	1
1.3 频谱感知接口和数据结构	2
1.4 数学工具	4
1.4.1 凸优化	4
1.4.2 博弈论	5
1.4.3 将“大数据”建模为高维随机矩阵	5
1.5 样本协方差矩阵	8
1.6 尖峰总体模型的高维样本协方差矩阵	10
1.7 随机矩阵和非交换随机变量	10
1.8 主成分分析	11
1.9 广义似然比检验	11
1.10 针对矩阵最佳逼近的布雷格曼发散	11
第2章 频谱感知：基础技术	13
2.1 挑战	13
2.2 能量检测：不存在确定或随机信号的先验信息	13
2.2.1 白噪声检测：低通情况	14
2.2.2 决策统计的时域表示	15
2.2.3 决策统计的谱表示	16
2.2.4 AWGN 信道上的检测和虚警概率	17
2.2.5 具备不相关系数的正交序列中随机过程的扩展形式：Karhunen-Loeve 扩展	17
2.3 使用二阶统计量的频谱感知	20
2.3.1 信号检测描述	20
2.3.2 广义稳态随机过程：连续时间	20
2.3.3 非平稳随机过程：连续时间	21
2.3.4 针对 WSS 随机信号的、基于谱相关的频谱感知：启发式方法	24
2.3.5 离散时间 WSS 随机信号的似然比检验	27
2.3.6 频谱相关性和似然比检验之间的渐近等价关系	29
2.3.7 噪声中连续时间随机信号的似然比检验：塞林提出的方法	30

2.4	统计模式识别：通过机器学习利用信号的先验信息	33
2.4.1	连续时间随机信号的 Karhunen-Loeve 分解	33
2.5	特征模板匹配	35
2.6	循环平稳检测	39
第3章	经典检测	42
3.1	量子信息描述	42
3.2	协同感知的假设检验	42
3.3	样本协方差矩阵	46
3.3.1	数据矩阵	46
3.4	具有独立行的随机矩阵	52
3.5	多元正态分布	56
3.6	样本协方差矩阵估计与矩阵压缩感知	64
3.6.1	最大似然估计	67
3.6.2	多重采样假设的似然比检验（维尔克斯检验）	68
3.7	似然比检验	70
3.7.1	广义高斯检测和估计器-相关器结构	70
3.7.2	采用重复观测进行检验	75
3.7.3	采用样本协方差矩阵进行检测	77
3.7.4	多随机向量的广义似然比检验	79
3.7.5	线性判别函数	80
3.7.6	复随机向量的相关结构检测	81
第4章	非交换随机矩阵的假设检验	83
4.1	为什么采用非交换随机矩阵	83
4.2	协方差矩阵的偏序： $A < B$	83
4.3	完全正映射的偏序： $\Phi(A) < \Phi(B)$	85
4.4	利用优化的矩阵偏序关系： $A < B$	87
4.5	酉不变范数的偏序： $\ A\ < \ B\ $	90
4.6	多副本正定矩阵的偏序： $\sum_{k=1}^K A_k \leq \sum_{k=1}^K B_k$	90
4.7	正算子值随机变量的偏序： $\text{Prob}(A \leq X \leq B)$	90
4.8	使用随机序的偏序： $A \leq_{st} B$	94
4.9	量子假设检测	95
4.10	多副本量子假设检测	97
第5章	大维随机矩阵	99
5.1	大维随机矩阵：矩量法、斯蒂尔切斯变换和自由概率	99
5.2	使用大维随机矩阵的频谱感知	101
5.2.1	系统模型	101
5.2.2	马尔琴科-帕斯图尔定律	103

5.3 矩量法	107
5.3.1 谱分布极限	108
5.3.2 极特征值极限	111
5.3.3 谱分布的收敛速度	113
5.3.4 标准向量输入向量输出模型	114
5.3.5 广义密度	114
5.4 斯蒂尔切斯变换	115
5.4.1 基本定理	118
5.4.2 大维随机汉克尔、马尔可夫和托普利兹矩阵	125
5.4.3 随机矩阵的信息加噪声模型	127
5.4.4 使用大维随机矩阵的广义似然比检验	132
5.4.5 白噪声中的大维信号检测	138
5.4.6 $(A+B)^{-1}B$ 的特征值及其应用	142
5.4.7 典型相关分析	144
5.4.8 子空间之间的角度和距离	145
5.4.9 多元线性模型	145
5.4.10 协方差矩阵的相等性	146
5.4.11 多元判别分析	146
5.5 案例研究与应用	147
5.5.1 使用大维随机矩阵的基本实例	147
5.5.2 斯蒂尔切斯变换	148
5.5.3 自由解卷积	150
5.5.4 MIMO 系统的最优预编码	150
5.5.5 马尔琴科和帕斯图尔概率分布	151
5.5.6 极特征值的收敛性与波动	152
5.5.7 信息加噪声模型和尖峰模型	152
5.5.8 假设检验和频谱感知	154
5.5.9 无线网络中的能量估计	156
5.5.10 多源功率推理	158
5.5.11 目标检测、定位与重构	158
5.5.12 智能电网中的状态估计和恶意攻击者	161
5.5.13 协方差矩阵估计	163
5.5.14 确定性等价式	166
5.5.15 局部故障检测与诊断	169
5.6 大维协方差矩阵的正则估计	169
5.6.1 协方差正则估计	170
5.6.2 联合逆矩阵	171
5.6.3 通过阈值选取实现协方差正则化	172

5.6.4	正则样本协方差矩阵	173
5.6.5	协方差矩阵估计的最佳收敛速率	175
5.6.6	联合平稳过程的样本自协方差矩阵	178
5.7	自由概率	180
5.7.1	大维随机矩阵和自由卷积	184
5.7.2	范德蒙矩阵	186
5.7.3	采用范德蒙矩阵的卷积和解卷积	193
5.7.4	有限维统计推断	195
第6章	凸优化	198
6.1	线性规划	200
6.2	二次规划	200
6.3	半定规划	201
6.4	几何规划	202
6.5	拉格朗日对偶性	204
6.6	优化算法	205
6.6.1	内点法	205
6.6.2	随机算法	205
6.7	鲁棒优化	206
6.8	多目标优化	209
6.9	无线资源管理优化	210
6.10	实例与应用	211
6.10.1	多输入多输出超宽带通信系统的频谱效率	211
6.10.2	采用非相干接收机的单输入单输出通信系统的宽带波形设计	215
6.10.3	多输入单输出认知无线电的宽带波形设计	221
6.10.4	宽带波束形成设计	227
6.10.5	用于认知无线网络优化分解的分层	230
6.11	小结	237
第7章	机器学习	238
7.1	无监督学习	241
7.1.1	基于质心的聚类	242
7.1.2	k -最近邻居算法	242
7.1.3	主成分分析	242
7.1.4	独立成分分析	244
7.1.5	非负矩阵分解	245
7.1.6	自组织映射	246
7.2	监督学习	246
7.2.1	线性回归	246
7.2.2	Logistic 回归	247

7.2.3	神经网络	247
7.2.4	决策树学习	247
7.2.5	朴素贝叶斯分类器	248
7.2.6	支持向量机	248
7.3	半监督学习	251
7.3.1	约束聚类	251
7.3.2	联合训练	251
7.3.3	基于图形的方法	251
7.4	直推式学习	252
7.5	迁移学习	252
7.6	主动学习	252
7.7	强化学习	252
7.7.1	Q-学习	253
7.7.2	马尔可夫决策过程	253
7.7.3	部分可观测 MDP	254
7.8	基于核的学习	256
7.9	降维	256
7.9.1	核主成分分析	257
7.9.2	多维标度	259
7.9.3	ISOMAP 算法	260
7.9.4	局部线性嵌入	260
7.9.5	拉普拉斯特征映射	260
7.9.6	半定嵌入	261
7.10	集合学习	263
7.11	马尔可夫链蒙特卡罗	263
7.12	滤波技术	265
7.12.1	卡尔曼滤波	265
7.12.2	粒子滤波	268
7.12.3	协同滤波	269
7.13	贝叶斯网络	269
7.14	小结	270
第 8 章	敏捷传输技术 (I): 多输入多输出	271
8.1	MIMO 的优点	271
8.1.1	阵列增益	271
8.1.2	分集增益	271
8.1.3	复用增益	272
8.2	空时编码	272
8.2.1	空时分组编码	272

8.2.2	空时网格编码	274
8.2.3	分层空时编码	274
8.3	多用户 MIMO	275
8.3.1	空分多址接入	275
8.3.2	MIMO 广播信道	275
8.3.3	MIMO 多址信道	277
8.3.4	MIMO 干扰信道	278
8.4	MIMO 网络	280
8.5	MIMO 认知无线网络	282
8.6	小结	283
第 9 章	敏捷传输技术 (II): 正交频分复用	284
9.1	OFDM 的实现	284
9.2	同步	286
9.3	信道估计	287
9.4	峰值功率问题	289
9.5	自适应传输	289
9.6	频谱成形	291
9.7	正交频分多址接入	291
9.8	MIMO OFDM	293
9.9	OFDM 认知无线网络	293
9.10	小结	294
第 10 章	博弈论	295
10.1	博弈的基本概念	295
10.1.1	博弈元素	295
10.1.2	纳什均衡: 定义与存在	296
10.1.3	纳什均衡: 计算	297
10.1.4	纳什均衡: 零和博弈	298
10.1.5	纳什均衡: 贝叶斯情形	298
10.1.6	纳什均衡: 随机博弈	299
10.2	主用户模拟攻击博弈	302
10.2.1	PUE 攻击	302
10.2.2	两个玩家的情形: 战略式博弈	303
10.2.3	队列动态特性中的博弈: 随机博弈	306
10.3	信道同步中的博弈	309
10.3.1	博弈背景	309
10.3.2	系统模型	310
10.3.3	博弈描述	311
10.3.4	贝叶斯均衡	311