

“十一五”
国家重点图书出版规划项目

4G/B4G 关键技术及系统

本书关键内容是基于
作者所在的课题组过去
10年在新一代宽带无线
移动通信领域的科研成果
积累编著而成

4G/Beyond 4G
Key Technology and System

□ 陶小峰 崔琪楣 许晓东 张月霞 编著



“十一五”
国家重点图书出版规划项目

4G/B4G 关键技术及系统

4G/Beyond 4G
Key Technology and System

□ 陶小峰 崔琪楣 许晓东 张月霞 编著



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

4G/B4G关键技术及系统 / 陶小峰等编著. — 北京 :
人民邮电出版社, 2011.11
ISBN 978-7-115-26190-8

I. ①4… II. ①陶… III. ①移动通信—通信技术
IV. ①TN929.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第161590号

内 容 提 要

本书从当前移动通信关键理论与技术出发,介绍了4G/B4G中涉及的从物理层到网络层的主要关键技术。本书主要内容包括当前主要移动通信系统的组网架构及频率规划,4G/B4G中涉及的数学问题,OFDM及MIMO,压缩感知技术,组网技术及资源分配、接入控制、功率控制等资源管理技术,并对未来绿色无线通信网及其关键技术进行了介绍。本书最后结合针对未来无线通信网络的试验系统与试验网,对各项关键技术的实现方法进行了简要介绍。

本书内容丰富,是一本理论、技术与应用实践相结合的技术书籍,适合于从事移动通信相关方向科研与学习的高校师生及工程技术人员阅读与参考。

4G/B4G 关键技术及系统

- ◆ 编 著 陶小峰 崔琪楣 许晓东 张月霞
责任编辑 姚予疆
执行编辑 刘 洋
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京昌平百善印刷厂印刷
- ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 19
字数: 465千字
印数: 1—3 500册
- 2011年11月第1版
2011年11月北京第1次印刷

ISBN 978-7-115-26190-8

定价: 59.00 元

读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154

前 言

20 世纪 90 年代以来,信息技术以其独特的渗透力和极强的带动性改变着人类的生产和生活方式,信息化正在成为经济增长和社会进步的主导力量之一。1987 年至今,中国的移动通信经历了从无到有、从 TACS 第一代模拟移动通信(1G)、GSM 和 IS-95 CDMA 第二代移动通信(2G)、IMT-2000 第三代移动通信(3G)及增强、LTE 到当前正如火如荼开展的 IMT-Advanced(4G)标准化,历经了从小到大的奋斗历程。当前,移动通信标准不断演进,涌现出大量的新技术,这些技术的出现引领着移动通信系统朝着宽带化、高速化、移动化、泛在化方向不断发展。

本书首先总结了当前移动通信系统的频谱规划、关键物理层与组网技术以及 4G 研究计划,然后介绍了正交频分复用技术、多输入多输出技术、压缩感知理论及应用、分布式协作组网理论与技术、无线资源管理策略等新一代宽带移动通信系统的若干关键技术。部分关键技术已经在 FuTURE 4G TDD 移动通信试验系统及试验网中得到验证,因此书中部分章节给出了一些算法在试验系统中的评估结果,供读者研究参考。本书最后一章详细介绍了 FuTURE 4G TDD 移动通信试验系统的总体解决方案以及网络架构、物理层、试验系统硬件开发,书中还概括介绍了当前通信领域十分关注的绿色无线通信网络关键技术研究的现状与目标。

希望本书能对移动通信领域的学者、研究人员和技术开发人员起到积极的参考作用,也对相关通信类研究生和高年级本科生起到学习借鉴的作用。由于作者水平和时间有限,书中缺点错误在所难免,望读者批评指正。编辑邮箱:liuyang@ptpress.com.cn。

作 者
2011 年 9 月

致 谢

本书的关键内容是基于作者所在的课题组过去 10 年在新一代宽带无线移动通信领域的科研成果积累而编著的。在此要感谢很多一起奋斗的同事，有张平教授、王勇博士、姜军副教授、田辉教授、李立华副教授、张建华教授、张轶凡博士、王强博士、陈昊老师、王莹教授、康桂霞教授等，他们在无线传输与组网关键技术的理论分析、仿真评估与试验验证方面均给予了指导和帮助，也对本书个别章节提出了意见和修改建议，作者在此一并致谢。此外，还要感谢课题组的徐月巧、杨锐、罗冰、陈鑫、杨现俊、杨姗、李晓娜、王辉、尹越、王达、吴德壮、张雪菲、罗成金等，他们在本书的编著、校对和图表处理等方面做了很多工作。书中部分内容来自于作者所在研究所培养的部分博士及硕士研究生毕业论文，特别感谢徐璿博士、尤明厚博士、周明宇博士、许方敏博士、韩娟博士、王轶博士、章辉博士、舒晶硕士、沈楠硕士、李雨翔硕士、赵英宏硕士等。

另外，感谢国家自然科学基金委、国家“863”科技计划、国家科技重大专项和北京市科技计划、北京市自然科学基金委的项目支持，这些项目为我们课题组提供了良好的科研平台和条件支持。

最后，十分感谢家人对作者工作的大力支持和理解。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 本书目标	1
1.2 新一代移动通信技术与系统	2
1.3 本书结构	3
参考文献	5

第 2 章 当前移动通信技术及系统概述	7
2.1 频率规划	7
2.1.1 第三代移动通信的频率规划	7
2.1.2 LTE 的频率规划	8
2.1.3 本节小结	9
2.2 当前的移动通信系统	10
2.2.1 3G 移动通信系统概述	10
2.2.2 LTE 系统概述	13
2.2.3 Wi-Fi、WiMAX 系统	17
2.2.4 本节小结	20
2.3 当前主要移动通信技术	20
2.3.1 调制技术	20
2.3.2 信道编码和交织技术	20
2.3.3 分集技术	22
2.3.4 本节小结	23
2.4 当前移动通信组网	23
2.4.1 3G 组网	23
2.4.2 WiMAX、Wi-Fi 组网	26
2.4.3 LTE 组网	28
2.4.4 本节小结	30
2.5 当前 4G 研究计划	30
2.5.1 其他国家和组织关于 4G 的	

研究计划	31
2.5.2 中国 4G 研究计划	31
2.5.3 本节小结	32
参考文献	32

第 3 章 与本书相关的数学问题	35
3.1 信息论概述	35
3.1.1 熵、互信息	36
3.1.2 信道容量	38
3.1.3 离散信道的容量	38
3.1.4 连续信道的容量	39
3.1.5 网络信息论	43
3.2 凸优化	50
3.2.1 最优化问题	50
3.2.2 约束优化问题的求解	50
3.2.3 凸优化有关概念的定义	53
3.2.4 凸优化	53
3.3 本章小结	53
参考文献	54

第 4 章 4G 的共性技术之——OFDM	56
4.1 最早的多址技术	56
4.1.1 频分多址	56
4.1.2 时分多址	57
4.1.3 码分多址	57
4.2 CDMA 多址之后的 OFDMA	57
4.3 OFDM 技术介绍	58
4.3.1 OFDM 的发展历史	58
4.3.2 OFDM 的基本原理	58
4.3.3 OFDM 技术的优缺点	62

4.4 OFDM 同步.....63	5.2.1 分层空时码.....101
4.4.1 一般数字通信系统中的 同步.....63	5.2.2 预编码技术.....102
4.4.2 OFDM 通信系统中的 同步要求.....64	5.3 空间分集技术.....104
4.4.3 同步对 OFDM 系统的 影响.....65	5.3.1 空时格码.....104
4.4.4 OFDM 系统的同步算法.....67	5.3.2 空时分组码.....107
4.5 OFDM 信道估计.....73	5.4 波束赋形技术.....109
4.5.1 OFDM 的系统模型.....73	5.5 不同 MIMO 技术的结合.....110
4.5.2 二维 WIENER 滤波的 理论.....74	5.5.1 空间分集技术与波束赋形 天线技术的结合 (STBC-BF).....110
4.5.3 在二维格上的导频模式 比较.....75	5.5.2 空间分集技术与空间 复用技术的结合 (STBC-SM).....110
4.5.4 时域和频域抽样率的 研究.....78	5.6 MIMO 检测技术.....111
4.5.5 二维信道估计算法的 改进.....79	5.6.1 硬判决输出检测算法.....111
4.6 MIMO-OFDM 的信道估计.....80	5.6.2 迭代 MIMO 接收机 技术.....113
4.6.1 MIMO 技术与 OFDM 技术的结合.....80	5.6.3 MIMO 检测算法与 联合检测.....115
4.6.2 MIMO-OFDM 系统模型.....80	5.7 MIMO 技术在 3GPP LTE 系统中的应用.....120
4.6.3 MIMO-OFDM 中信道 估计算法描述.....81	5.7.1 空分复用预编码.....120
4.7 MIMO-OFDM 的信道估计 DSP 实践.....87	5.7.2 空间分集预编码.....123
4.7.1 信道估计的 DSP 设计.....87	5.7.3 多用户 MIMO 技术.....125
4.7.2 信道估计的 DSP 实现.....88	5.8 MIMO 接收机在吉比特系统的 实践.....126
4.7.3 性能分析.....94	5.8.1 算法的逻辑实现.....127
4.8 本章小结.....95	5.8.2 算法的流水段设计.....129
参考文献.....96	5.8.3 定点化方案.....129
	5.9 本章小结.....130
	参考文献.....131
第 5 章 言必称的 MIMO.....99	第 6 章 压缩感知.....136
5.1 MIMO 技术概论.....99	6.1 概述.....137
5.1.1 MIMO 系统模型.....99	6.2 离散域压缩感知的介绍.....137
5.1.2 MIMO 信道的静态 容量.....100	6.2.1 信号的稀疏表达.....137
5.1.3 典型的 MIMO 技术.....101	6.2.2 测量矩阵的设计.....137
5.2 空间复用技术.....101	6.2.3 恢复算法的设计.....138
	6.2.4 其他压缩感知恢复

算法.....	139
6.2.5 信号的稀疏表达、测量矩阵 以及恢复算法之间的 关系.....	144
6.3 模拟域的压缩感知介绍	144
6.3.1 模拟信息转换器	144
6.3.2 调制宽带转换器	146
6.3.3 其他方法	152
6.4 压缩感知的应用	154
6.4.1 压缩感知在频谱检测 中的应用	154
6.4.2 压缩感知在无线定位 中的应用	155
6.5 对压缩感知的扩展	156
6.6 当前压缩感知研究中所遇到的 挑战.....	158
6.7 本章小结.....	160
参考文献.....	160
第7章 组网技术.....	164
7.1 蜂窝网络结构的发展与演进	164
7.2 群小区网络架构	166
7.2.1 群小区概念	166
7.2.2 广义分布式群小区	166
7.2.3 群小区与分布式天线 技术.....	170
7.2.4 群小区与联合发送 技术.....	171
7.2.5 群小区与分层空时码	171
7.2.6 群小区的容量	172
7.3 基于群小区架构的滑动切换	175
7.3.1 滑动切换定义	175
7.3.2 滑动切换模式	176
7.4 基于群小区架构的快速小区组 选择.....	178
7.5 基于群小区架构的协作多点 传输技术	179
7.5.1 协作多点传输架构	179
7.5.2 CoMP 应用场景	179

7.5.3 CoMP 小区簇构建	181
7.6 本章小结.....	182
参考文献.....	182
第8章 资源管理.....	185
8.1 资源管理策略面临的挑战.....	185
8.2 接入控制.....	186
8.2.1 最大效用准则接入控制 方法.....	186
8.2.2 在群小区架构中的 应用	190
8.2.3 性能分析	191
8.2.4 小结	194
8.3 资源分配.....	194
8.3.1 支持协作组网架构的 资源分配策略.....	195
8.3.2 基于蚁群优化的资源 分配策略.....	201
8.3.3 基于资源池概念的 资源分配策略.....	208
8.4 功率控制.....	220
8.4.1 系统模型	221
8.4.2 纳什均衡的存在性和 唯一性.....	222
8.4.3 算法流程.....	227
8.4.4 性能评估.....	227
8.4.5 小结	229
8.5 本章小结.....	229
参考文献.....	230
第9章 绿色无线通信	231
9.1 4G 的危机	231
9.1.1 移动通信的演进.....	231
9.1.2 为什么需要绿色通信.....	232
9.1.3 能耗构成分析.....	234
9.2 绿色无线通信网.....	235
9.2.1 绿色无线通信网概述.....	235
9.2.2 绿色无线通信网目标.....	236
9.2.3 绿色无线通信的指标.....	236
9.3 绿色无线通信关键技术.....	237

9.3.1	协作分布式网络架构	237
9.3.2	无线传输及组网技术	238
9.3.3	认知无线网络	239
9.3.4	绿色小区设计	240
9.4	绿色基站子系统	246
9.4.1	空调节能	246
9.4.2	电源节能	248
9.4.3	建筑节能	249
9.4.4	数据设备节能	249
9.4.5	网络规划与设计节能	250
9.5	自组织通信网	251
9.5.1	设计原则	252
9.5.2	跨层设计	253
9.6	绿色无线通信	253
9.7	本章小结	255
	参考文献	255

第10章 FuTURE 4G TDD 系统

	实践	257
10.1	FuTURE 4G TDD 系统设计指标	257
10.2	FuTURE 4G TDD 系统的总体架构	257
10.2.1	试验系统总体结构	258
10.2.2	试验系统规模	258
10.2.3	演示业务	259
10.2.4	双工和多址方式	259
10.2.5	系统参数	259
10.3	FuTURE 4G TDD 组网结构——群小区架构	260
10.3.1	群小区扁平接入网架构	260
10.3.2	控制平面与数据平面的分离	261
10.3.3	接入网实体	261
10.4	FuTURE 4G TDD 系统帧结构	262
10.5	FuTURE 4G TDD 系统上行链路设计	263

10.5.1	上行传输方案链路	263
10.5.2	上行 MIMO 信号处理算法	264
10.5.3	同步算法	265
10.5.4	信道估计算法分析	266
10.5.5	联合检测算法分析	266
10.6	FuTURE 4G TDD 系统下行链路设计	266
10.6.1	多址方案	266
10.6.2	链路结构	267
10.6.3	关键模块结构及基本参数	267
10.7	FuTURE 4G TDD 系统信道编解码	272
10.7.1	编码设计方案	272
10.7.2	译码设计方案	273
10.8	FuTURE 4G TDD 系统全链路性能仿真结果	275
10.9	FuTURE 4G TDD 系统 MAC 层设计	276
10.9.1	无线空中接口协议结构	276
10.9.2	数据链路层协议结构及各子层功能概述	276
10.9.3	RLC 子层设计	277
10.9.4	MAC 子层设计	278
10.9.5	自适应链路控制物理层	280
10.10	无线资源管理模块概述	281
10.10.1	QoS 管理	282
10.10.2	接纳控制	283
10.10.3	动态资源分配	284
10.10.4	RRC 功能	286
10.10.5	切换	287
10.11	本章小结	288
	参考文献	289
	缩略语	290

第 1 章

绪论

本章是绪论，首先简介本书目标，其次是新一代移动通信技术，最后介绍了本书的章节安排。

1.1 本书目标

20 世纪 80 年代中期，当模拟蜂窝移动通信系统（1G）刚投放市场时，世界上的发达国家就在研制第二代移动通信系统（2G），其采用时分多址（TDMA）技术和码分多址（CDMA）技术，主要分为 GSM 和 IS-95 两种体制。与 1G 相比，2G 具有保密性强、频谱利用率高、业务丰富、标准化程度高等特点。但由于 2G 采用不同的制式，移动通信标准不统一，用户只能在同一制式覆盖的范围内进行漫游，因而无法进行全球漫游。同时，由于 2G 系统带宽有限，限制了数据业务的应用，无法实现高速率业务。

随着第三代移动通信系统（3G）WCDMA、cdma2000、TD-SCDMA 和 3.5G HSPA 在全球范围内的推广商用，移动业务主体开始向更高速率及更高质量的无线通信业务（如多媒体业务等）逐步转变。为满足未来用户的进一步需求，研究第四代移动通信系统必须对第二代以及第三代移动通信系统在理论上进行重大突破，采用更先进的无线传输技术，以支持传输速率达 100Mbit/s（E3G）~1Gbit/s（4G）量级的数据传输能力，给用户 provide 高速可靠的通信服务。国际上针对 E3G 的标准化工作包括 3GPP 于 2004 年 11 月启动的长期演进（LTE）计划以及 3GPP2 于 2005 年启动的空中接口演进/超移动宽带计划（AIE/UMB）。LTE 改进并增强了 3G 的空中接入技术，采用 OFDM 和 MIMO 作为其无线网络演进的标准，在 20MHz 带宽下能够提供下行 100Mbit/s 与上行 50Mbit/s 的峰值速率^[1]，改善了小区边缘用户的性能，提高了小区容量，降低了系统延迟等。移动通信发展的各个阶段、主要技术特点和业务能力如图 1-1 所示。

2002 年，通信领域的学术科研机构开始着手第四代移动通信系统（4G）的研究。欧盟的 WINNER（Wireless World Initiative New Radio）项目深入研究第四代移动通信技术。日本成立 mITF（mobile IT Forum），其目标是通过早日开展关于未来移动通信系统的研发，以实现未来移动通信系统和服务。韩国成立未来移动通信论坛（NGMC）专门进行未来移动通信系统方面的研究，开展了业务、技术和频谱方面的相关研究工作。

在国内，中国高技术研究发展计划（“863”计划）中的面向超三代/四代（B3G/4G）移动通信发展的重大研究计划——未来通用无线环境研究计划（Future Technology for Universal Radio Environment，FuTURE 计划）第一期于 2002 年 5 月启动（2003 年 4 月 30 日完成），第二期于 2003 年 11 月启动（2006 年 10 月完成）。此后一年，与之配套的国家自然科学基金

重大项目“未来移动通信系统基础理论与技术研究”也如期完成。在“十一五”“863”计划中的国家科技部的“Gbps 无线传输试验系统研究开发”相关课题也于 2009 年 9 月结题。这些项目的主要目标是面向未来 10 年无线通信领域的发展趋势与需求，重点突破未来移动通信系统的关键技术。2009 年 1 月开始启动了“新一代宽带无线移动通信网”的国家科技重大专项现在（2011 年）也陆续进入了结题阶段。可见新一代无线移动通信研究对于我国通信信息领域的重要性以及国家对此的重视。

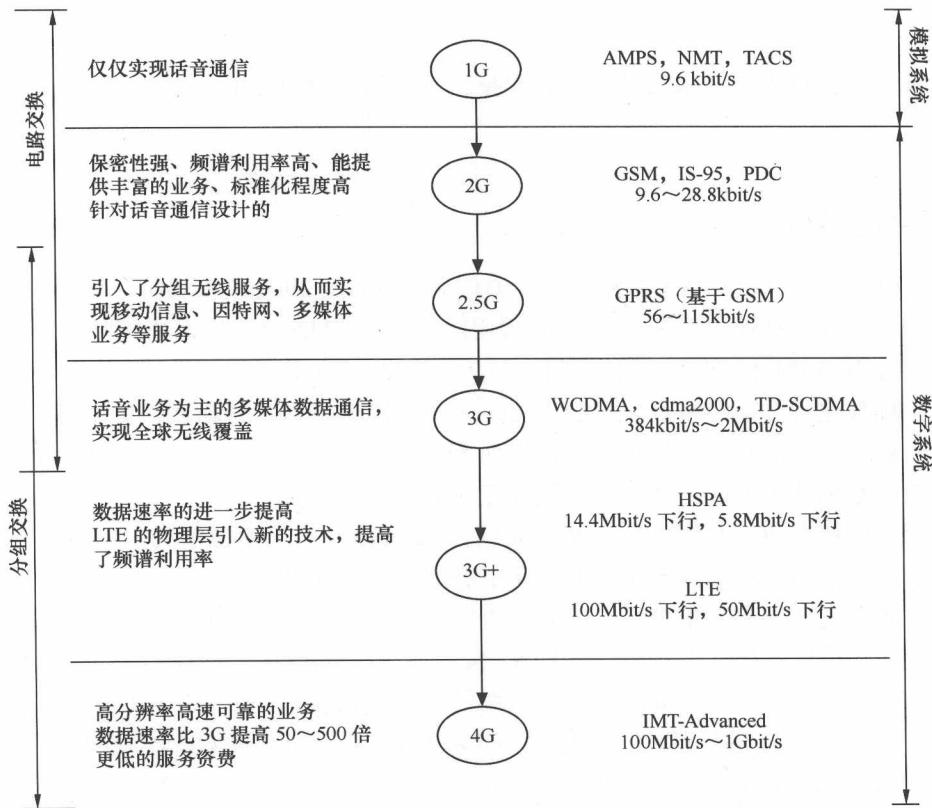


图 1-1 移动通信发展的各个阶段、主要技术特点和业务能力

本书作者长期从事 4G 研究，曾担任 FuTURE 计划特别工作组组长（2003 年 11 月~2006 年 10 月），在国家自然科学基金重大项目和国家“863”重大项目的支持之下，组建了第一个 4G TDD 特征的群小区——协同多点（CoMP）试验网，并组织完成了“863”课题“Gbps 无线传输试验系统研究开发”，主持了“IMT-Advanced 开放性关键技术研究——群小区架构”的国家科技重大专项。本书将与无线工程师们分享关于 4G 关键技术研究的成果和演示系统搭建的经验。另外，书中适当补充通信有关的数学公式及其推导，以及北京邮电大学无线新技术研究所一些优秀博士论文的片段，供相关通信类研究生和高年级本科生学习使用。

1.2 新一代移动通信技术与系统

无线通信技术日新月异，10 年前当我们对 4G 技术的研究关键技术开展研究时，主要研

究物理层的 OFDM、多天线技术、空时码、联合检测、联合发送等,链路层的 QoS 和网络层的无线资源管理以及组网技术。下面对几项关键技术简单介绍。

OFDM: 正交频分复用^[2] (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 于 1970 年在美国被申请了专利。1971 年, Weinstein 和 Ebert 在发送端和接收端的调制和解调处理部分分别使用快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT), 从而大大降低了 OFDM 应用硬件的复杂度。由于 OFDM、多载波技术能有效地消除 CDMA 技术在传输高速信息时产生的径间干扰, 被认为是未来宽带移动通信系统的基础技术。许多研究机构对 OFDM、多载波技术的研究已经形成较为成熟的标准。

多天线技术: MIMO 多天线技术在室内传播环境下的频谱利用率可高达 $20 \sim 40 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$ ^[3~5]。根据多天线利用方式的不同, MIMO 技术又可进一步分为基于空间分集的 MIMO 技术 (如空时格码、空时分组码) 和基于空分复用的 MIMO 技术 (如 V-BLAST、D-BLAST 等)。前者通过多天线信息的“复制”进一步增强系统性能, 后者则利用多路并行传输的方式有效提高系统的频谱利用率。多天线的联合检测、联合发送也可以认为是广义的多天线技术。

联合检测: 1993 年德国的 Kaiserslautern 大学的 RF 实验室提出了联合检测的概念^[6]。同年 B.Steiner 在文献中提出了应用在联合检测系统中的 Steiner 信道估计方法, 联合检测算法初具雏形。此后多国的学者对联合检测技术做了深入的研究, 取得了很大进展。其中发表于 1996 年的文献, 系统地概述分析了几种联合检测系统的实现和性能。本书分析了 MIMO 技术与联合检测的关系。

联合发送: 联合发送^[7]也是由德国 Kaiserslautern 大学 RF 实验室的 P.W.Baier、M.Meurer 等人于 2000 年提出了一种 TD-CDMA 系统中的下行链路传输技术。联合发送 (JT) 技术能大大简化终端设备 (移动台), 并具有与多种先进通信技术方便结合等众多的优点, 正逐渐引起人们的广泛重视。联合发送技术与 2008 年 3GPP 里提出协同多点有相似之处。

广义分布式网络架构: 广义分布式网络架构 (群小区架构)^[8~13]是 2001 年提出来的, 它旨在解决小区覆盖、频繁切换和小区边缘效率问题, 该架构结合了分布式天线系统在覆盖方面的优势和多天线技术在容量与频谱效率等方面的优势, 可以提供更高的系统容量及更广泛的覆盖范围, 同时也为物理层新技术的使用提供了有利条件。

今天 4G 的研究已经进入成果标准化的阶段, 那么什么技术将是 4G 以后 (B4G) 的技术呢, 本书以压缩感知、绿色无线通信等为题展开了探讨。

1.3 本书结构

本书分为 10 章。

第 1 章为绪论, 简述了先进移动通信的发展、本书的目的以及本书的组织结构。

第 2 章总结了当前移动通信系统的频谱规划、关键物理层与组网技术以及 4G 研究计划。本章针对当前移动通信的技术和系统作了简要概述。首先介绍当前国际电联以及我国在 3G 与 LTE 系统的频率规划, 接着介绍 TD-SCDMA、WCDMA、cdma2000、LTE、WiMAX 及 Wi-Fi 移动通信技术的标准化过程及基本的技术特征, 并介绍了当前移动通信中的一些典型和具有代表性的技术, 如调制解调、信道编码以及分集等和移动通信系统网络, 最后简要地

介绍了官方标准化组织 ITU-R 对第四代移动通信 (IMT-Advanced) 的演进过程、标准提交、需求定义和关键特性, 以及国内外在 4G 发展过程中的主要进展。

第 3 章针对在通信领域中广泛存在的数学问题作了简要概述。首先介绍了移动通信的核心数学背景, 即信息论的相关知识, 分别对离散信道的信息熵和互信息作了简单介绍。随后推导了离散信道的信道容量公式, 进一步地, 将离散信道模型推广到实际的连续信道系统, 并详细推导了相应的容量表达式——著名的 Shannon 信道容量公式, 本书第 5 章应用了相关理论。接着本章重点介绍了在通信中求解实际问题广泛采用的数学工具凸优化的相关知识。凸优化作为一种寻找最优解的方法, 有着非常广泛的应用, 在无线通信中, 凸优化在基于 OFDM 的功率分配方面有重要的应用。

第 4 章讨论了 OFDM 技术的基本理论同步与信道估计算法。首先简介各种多址技术以及 OFDM 技术的基本原理和优缺点。接着介绍 OFDM 技术中的同步技术, 并给出了两种同步算法。除了同步技术之外, 本章还介绍了信道估计技术, 主要讲了几种典型的导频模式。第 6 节在 OFDM 的信道估计技术基础上, 详细介绍 MIMO-OFDM 的信道估计技术, 包括系统模型以及 4 种信道估计算法。最后介绍了 MIMO-OFDM 的信道估计 DSP 实践, 以科研项目为例介绍了信道估计的 DSP 设计与实现, 并分析了系统性能。

第 5 章首先介绍了 MIMO 技术的基本原理, 包括系统模型、MIMO 信道的静态容量分析。然后详细地介绍了三种典型的 MIMO 技术: 对于空间复用, 详述分层空时码和闭环预编码技术; 对于空间分集, 介绍空时格码、空时分组码的原理和编码结构; 对于波束赋形, 介绍特征分解赋形和固定波束赋形两种实现算法, 并提出 3 种 MIMO 技术的相互结合; 进一步, 分硬判决输出检测、迭代 MIMO 接收两大类介绍 MIMO 检测算法。最后, 介绍 MIMO 技术在 3GPP LTE 系统中的应用, 以及基于 QR 分解的快速 V-BLAST 排序检测算法在 FPGA 中的实现。

第 6 章讨论分析压缩感知技术的可行性。压缩感知理论是 2004 年由 David L. Donoho, Emmanuel J. Candes 和 Terence Tao 等提出来的, 它能够恢复以低于奈奎斯特速率采样的稀疏信号。本章第 1 节概述了压缩感知的起源与发展; 第 2 节主要介绍了最初所提出的离散压缩感知的基本原理, 包括信号的系数表达、测量矩阵的设计、恢复算法的设计; 第 3 节则主要介绍了离散压缩感知的推广——模拟域的压缩感知, 主要包括模拟信息转换器和调制宽带转换器两种方法; 第 4 节则主要介绍了当前压缩感知在认知无线电中频谱检测和无线定位中的应用, 最后探讨当前压缩感知的扩展以及它所面临的挑战。

第 7 章探讨组网技术。本章重点针对现有蜂窝网络架构所面临的需求, 介绍面向新一代蜂窝移动通信系统的组网关键技术。首先介绍了蜂窝网络架构的发展与演进, 接着结合分布式天线、联合发送及分层空时码等技术介绍了作者提出的广义分布式蜂窝网络架构——群小区架构, 并基于群小区架构介绍了滑动切换策略、协作多点传输 (CoMP) 架构等。

第 8 章介绍无线资源管理 (Radio Resource Management, RRM) 策略。首先简述了无线资源管理策略的概念及目标, 并分别针对第二、第三、第四代移动通信系统具体分析总结了不同系统对无线资源管理策略所提出的挑战。随后重点针对第四代无线通信系统引入了广义分布式架构对资源管理策略的影响, 从接入控制、资源分配、功率控制 3 个方面分别介绍了相关领域的主要难题及部分最新研究成果及技术方案。

第 9 章主要对绿色无线通信网的概念、目标以及实现进行了深入的分析与研究。本章

首先分析了当前移动通信网络下的能耗及其构成,并提出了绿色无线通信的目标和指标。在本章的第2部分,我们重点对绿色无线通信网的关键技术进行了研究,主要从网络架构、传输过程、组网、小区设计等多方面进行描述,对其中的关键算法和技术进行了阐释和说明。此外,鉴于无线通信网络中,基站子系统占据了主要的能量消耗,本章基于基站子系统的构成,对基站系统的节能减排进行了描述。在本章的最后,简要介绍了自组织网络并进行了总结。

第10章详细介绍了FuTURE TDD第四代移动通信系统的总体解决方案以及网络架构、物理层、试验系统硬件开发等应用的各项关键技术。

参考文献

- [1] Overview of 3GPP Release 8 V0.2.3, Jun.2011
- [2] Tjelta T., Nordbotten A., Annoni, et al, Future Broadband Radio Access System for Integrated Services with Flexible Resource Management, IEEE Communications Magazine, Vol. 39, Issue 8, Aug. 2001: 56-63
- [3] Foschini G. J., Layered Space-time Architecture for Wireless Communication in a Fading Environment when Using Multi-element Antennas, Bell Labs Technical Journal, Autumn, 1996: 41-59
- [4] Foschini G. J., Gans M. J., On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment when Using Multiple Antennas, Wireless Personal Communications, Vol. 6, Issue 3, 1998: 311-335
- [5] Chuah C-N., Foschini G. J., Valenzuela R. A., et al, Capacity Growth of Multi-Element Arrays in Indoor and Outdoor Wireless Channels, Proc. of IEEE WCNC, Vol. 3, Sept. 2000: 1340-1344
- [6] Baier, P.W., Nasshan, M. Recent results concerning the benefit of joint detection in CDMA systems. Spread Spectrum Techniques for Radio Communication Systems, IEE Colloquium on, vol., no., pp.5/1-5/4, 27 Apr 1993
- [7] Baier, P.W., Meurer, M., Weber, T., Troger, H. Joint transmission (JT), an alternative rationale for the downlink of time division CDMA using multi-element transmit antennas. Spread Spectrum Techniques and Applications, 2000 IEEE Sixth International Symposium on, vol.1, no., pp.1-5 vol.1, Sep 2000
- [8] Ping Zhang, Xiaofeng Tao, Jianhua Zhang, Ying Wang, Lihua Li, Yong Wang. A vision from the future: beyond 3G TDD. Communications Magazine, IEEE, vol.43, no.1, pp.38-44, Jan. 2005
- [9] Tao Xiaofeng, Shang Dan, Ni Li, et al. Group Cells and Slide Handover Mode. In ICCT 2003, Beijing, China: Nov. 20-22nd, 2002: 1318-1321
- [10] Tao Xiaofeng, Ni Li, Dai Zuojun, et al. In Intelligent Group Handover Mode in Multicell Infrastructure. In IEEE PIMRC2003. Beijing. China: Vol. 1, Sept. 7-10th, 2003: 351-354

- [11] Tao Xiaofeng. Novel Cell Infrastructure and Handover Mode. In the 9th WWRF Conference Contribution. Zurich, Switzerland: July 1-2nd, 2003
- [12] 陶小峰, 戴佐俊, 唐超, 等. 广义蜂窝网络结构及切换模式——群小区及群切换. 电子学报, 第 32 卷 (第 12A 期), 2004-12: 114-117
- [13] Xu Xiaodong, Tao Xiaofeng, Wu Chunli, et al. Group Cell Architecture for Future Mobile Communications System. In ICN/ICONS/MCL 2006, 23-29th, April 2006: 199-203

第 2 章

当前移动通信技术及系统概述

本章主要对当前移动通信系统作了简要概述。第 1 节介绍了国际电联和我国在 3G 与 LTE 系统中的频率规划。第 2 节则针对当前商用的 3G 系统 TD-SCDMA、WCDMA、cdma2000 以及 LTE、Wi-Fi、WiMAX 等系统作了概述。第 3 节介绍了当前移动通信系统中的典型技术,如调制解调、信道编译码、分集与复用等。第 4 节重点介绍了 TD-SCDMA、WCDMA、cdma2000 以及 LTE、Wi-Fi、WiMAX 等移动网络的架构和组成。最后,对第 4 代移动通信(IMT-Advanced)的系统要求与特性以及国内外在此领域取得的进展进行了总结说明。

2.1 频率规划

2.1.1 第三代移动通信的频率规划

无线电频率规划是无线电频率划分或分配的规定,即将某一频段内的某项业务的频率在地域或时间上的使用预先做出了统筹安排,以实现频率资源的有效利用并避免频率间的干扰。为了有效地使用有限的频率,对频率的规划和使用需要严格服从国际和国内的统一管理,否则将造成互相干扰或频谱资源的浪费。在无线电管理中,国际上的频率规划是通过召开世界(或区域)无线电大会(WRC)制定的;我国的频率规划由国家或地方无线电管理机构负责制定。

1. 国际电联(ITU)频率规划

国际电联对第三代移动通信系统(3G)的划分过程大致如下:1992年,世界行政无线大会(WARC)划分给未来公共陆地移动通信系统(FPLMTS)的频率范围是1885~2025MHz和2110~2200MHz,共230MHz^[1]。其中,1885~2010MHz(地对空)和2170~2200MHz(空对地),共60MHz用于卫星移动业务(MSS)。在世界无线电大会(WRC95)上,又确定了2005年以后的卫星移动通信系统(MSS)划分范围是1885~2025MHz和2160~2200MHz。2000年,ITU代表在土耳其的伊斯坦布尔召开世界无线电大会上规定了3个新的全球频段。这些频段是805~960MHz、1710~1885MHz和2500~2690MHz^[2]。

ITU为3G划分的频率大多数国家都已指配或正在指配给其他业务使用。同时,有的频段必须经过双边或多边协调才能使用,因此3G频率规划的困难极大。首先,应根据本国的经济和无线电业务发展需要,预测或计算出频谱的近期、中期和长期需求量,按照ITU的划分要求并结合本国的实际情况以及国外的经验来做规划。其次,由于频率重新划分和调整涉及的部门比较多,不但与电信业务运营商、设备生产商和用户有关,还与国家的频谱管理方针、政策和法规有密切关系,所以频率管理部门在做频率调整时还要广泛征求上述各部门和公众的意见。频率规划确定后,还需要一定时间进行清频工作。多数国家完成3G频率规划

都用了较长时间，对规划采取逐步实施的办法，以便逐步解决实施中遇到的问题。

2. 中国的频率规划

依据 ITU 有关第三代公众移动通信系统 (IMT-2000) 频率划分和技术标准，按照我国无线电频率划分规定，结合我国无线电频谱使用的实际情况，我国第三代公众移动通信系统频率规划如下^[3]：

(1) 主要工作频段：频分双工 (FDD) 方式，1920~1980MHz/2110~2170MHz；时分双工 (TDD) 方式，1880~1920MHz/2010~2025MHz。

(2) 补充工作频段 (与无线电定位业务共用)：频分双工 (FDD) 方式，1755~1785MHz/1850~1880MHz；时分双工 (TDD) 方式，2300~2400MHz。

(3) MMS 工作频段：1980~2010MHz/2170~2200MHz。

目前，在 800MHz/900MHz 频段及 1800MHz 频段的 2GHz/2.5GHz 相应频带，规划为向 3G 演进的扩展频带，其上、下行频率使用方式不变。WCDMA 标准获得 60MHz 的核心频段和 60MHz 的扩展频段；cdma 2000 标准获得 60MHz 的核心频段和 60MHz 的扩展频段；TD-SCDMA 标准获得 55MHz 的核心频段和 100MHz 扩展频段。我国第三代公众移动通信系统的频率规划思路，充分体现了我国重视与支持有自主知识产权的 TDD 方式的发展，并贯彻 FDD、TDD 有机互补与健康合理发展这一指导思想。

2.1.2 LTE 的频率规划

LTE 支持 1.25MHz、2.5MHz、5MHz、10MHz、15MHz 和 20MHz 的载波带宽设置，这种可变的信道带宽特性意味着频率规划与传统的 2G、3G 系统有很大的不同。其频率规划可以根据可用的频率资源以及组网需要进行灵活规划和配置，可用频点的个数不仅与可用的总频率资源有关，还与选择的信道带宽相关。但只有在 20MHz 载波带宽下，LTE 才能提供下行 100Mbit/s 峰值速率，故在预测 LTE 网络的频率需求时载波带宽应选为 20MHz。

ITU 推荐 LTE 频率：在 2007 年世界无线电大会 (WRC07) 上，将 IMT-2000 和 IMT-Advanced 统一为 IMT，在频谱使用上不再区分^[4]。LTE 是一种 IMT-2000 技术，理论上已分配给 IMT-2000 的频段和 WRC07 大会上新划分的频段均可由 LTE 使用。目前，3GPP LTE 标准中定义了如下工作频段：LTE FDD 定义的频段，除 450MHz、3400~3600GHz 频段外的所有 IMT 频段，即 WRC 07 大会上明确的 698~806/862MHz (我国为 698~806MHz)、2500~2690MHz 频段共 298MHz 频率，以及已规划的用于 2G 和 3G 中 FDD 业务的频段；TD-LTE 定义的频段有 1850~1920MHz、2010~2025MHz、2300~2400MHz 和 2570~2620MHz，共 195MHz。目前，无论是 ITU 还是 3GPP 都没有对 LTE 的频率需求给出明确的预测结论，但可采用蜂窝组网法对 LTE 的频率需求进行初步的预测。目前最新的关于 3GPP LTE 的频率规划见表 2-1^[5]。

表 2-1 LTE 的频率规划

LTE 的频率划分	上行频段	下行频段	双工方式
	$F_{UL,low} \sim F_{UL,high}$	$F_{DL,low} \sim F_{DL,high}$	
1	1920~1980MHz	2110~2170MHz	FDD
2	1850~1910MHz	1930~1990MHz	FDD
3	1710~1785MHz	1805~1880MHz	FDD