

中兴通讯技术专家多年研发与参会
经验梳理总结
中国通信标准化协会秘书长周宝信
倾情作序推荐

“十二五”

国家重点图书出版规划项目

LTE/LTE-Advanced Key Technologies and System Performance

4G 丛书

LTE/LTE-Advanced 关键技术与系统性能

□ 袁弋非 编著

013038605

TN929.53

486

“十二五”
国家重点图书出版规划项目

LTE/LTE-Advanced Key Technologies and System Performance **4G 丛书**

LTE/LTE-Advanced 关键技术与系统性能

□ 袁弋非 编著



TN 929.53
486

人民邮电出版社
北京

013038804

图书在版编目 (CIP) 数据

LTE/LTE-Advanced 关键技术与系统性能 / 袁弋非编
著. — 北京: 人民邮电出版社, 2013. 6
(4G丛书)
ISBN 978-7-115-31128-3

I. ①L… II. ①袁… III. ①无线电通信—移动网
IV. ①TN929.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第034613号

内 容 提 要

本书主要介绍 LTE/LTE-Advanced 空中接口的关键技术和系统性能。全书共 10 章, 可以分为两大部分, 前 4 章对 LTE 的基本设计、系统架构、系统仿真模型和性能进行了描述, 对应着 LTE 标准版本 8 的内容(多天线技术除外); 后 6 章对 LTE/LTE-Advanced 的主要先进技术和系统性能分章节进行展开介绍, 包括 MIMO、CoMP、载波聚合、异构网、无线中继、增强的物理下行控制信道等, 涵盖了 LTE 版本 8 中的多天线技术和版本 9 到版本 11 的内容。

本书适合从事无线蜂窝通信的研究开发人员和通信类专业的师生阅读参考。

4G 丛书

LTE/LTE-Advanced 关键技术与系统性能

- ◆ 编 著 袁弋非
责任编辑 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>
三河市海波印务有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 22.75
字数: 554 千字
印数: 1—2 500 册
- 2013 年 6 月第 1 版
2013 年 6 月河北第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-31128-3

定价: 69.00 元

读者服务热线: (010)67132692 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154

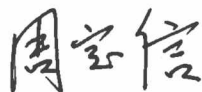
序 言

光纤通信、移动通信、互联网信息通信已把人类带入高度发达的信息通信时代，带入大数据挖掘和应用的信息时代。移动通信经过 30 多年的发展，历经一代（1G）模拟、二代（2G）数字、三代（3G）语音和中低速数据，四代（4G）完全进入高速数据时代。3.9G LTE 下行速率可达 100 Mbit/s，4G LTE-Advanced 下行速率可达 1 Gbit/s，移动通信与互联网融合形成的宽带移动互联网正在绽放出格外夺目的光彩。

2012 年 LTE 进入了高速发展的前期，全球商用网络从 2011 年的 40 个增长到 130 个。其中 TD-LTE 也迈出了坚实的步伐，从 2011 年的两个增长到 2012 年的 11 个。中国移动在我国 13 个城市建设了 2 万个 TD-LTE 基站的规模试验网络，并计划在 2013 年建设超过 20 万个基站的网络。

国际上从事 LTE/LTE-Advanced 的 3GPP 标准化组织，从 2004 年开始发起研究，到 2008 年首发版本 8（R8），再到 2010 年版本 10（R10）的 LTE-Advanced 的基本功能完成，直至 2012 年版本 11（R11）的进一步完善。本书正好抓住版本 11（R11）刚刚结束的时间点，及时地将 3GPP 最近 2 年至 3 年的研究和标准化成果呈现给读者。中国通信标准化协会（CCSA）是 3GPP 的组织成员，在 LTE/LTE-Advanced 的技术标准化工作中作出了重要贡献，主导了时分双工的 TD-LTE/TD-LTE-Advanced 的技术标准化工作。

中国移动、华为、中兴、大唐等国内企业都积极参与了 LTE/LTE-Advanced 的标准化工作。本书的作者袁弋非博士和他带领的团队，在协作中继和多天线信道码本等关键技术方面取得突破，将中兴主导的技术写入了标准，申请了十分有价值的基本核心专利。作者还凭借他在朗讯科技（Lucent Technologies, Bell Labs Innovations）积累的深厚无线通信理论功底和丰富的系统仿真经验，对 LTE/LTE-Advanced 各种应用场景进行了系统性能的仿真研究，深刻地描述了 LTE/LTE-Advanced 的各个关键技术。本书系统讲述了 LTE/LTE-Advanced 空口关键技术原理，以能够标准化的技术为主，顺带介绍一些实现方面的考虑，理论性、实用性、可读性好，对从事这方面工作的科研人员、工程技术人员、管理人员都有很好的学习和提高技术的价值。即使读者没有 LTE 的知识背景，也能从中得到对 LTE/LTE-Advanced 的总体了解。



中国通信标准化协会秘书长 周宝信

2013 年 3 月

前 言

移动通信经历了 30 多年的发展，从第一代，到第二代，到第三代，一直到第四代，如今进入了“分久必合”的时代：LTE/LTE-Advanced 在与 IEEE 的 WiMAX 和 3GPP2 的 UMB 的竞争中脱颖而出，得到多数运营商的认可，成为具有真正意义的世界性的蜂窝通信标准，在全球各个国家即将广泛部署。标准的国际化不仅发挥了规模经济所带来的巨大经济效益，而且对技术的进步和推广起到了重要的推动作用。作为 LTE/LTE-Advanced 的制定者，3GPP 正在成为无线通信行业里最主流的国际标准组织，吸引着业界大量的专业人士，也会聚了以前曾从事 WiMAX 和 UMB 标准研发的精英。3GPP 的成员众多，包括蜂窝网络运营商、系统设备商、终端制造商、芯片厂家，以及相关的测试仪器、天线、电源等厂家。通过这个国际性的舞台，无线通信领域的理论研究成果源源不断地转化为业界的关键新技术，迅速地被投入广阔的工业应用和实际部署。在短短的几年里，OFDM、先进的 MIMO、协同多点处理(CoMP)、载波聚合、异构网、无线中继、增强的控制信道、先进接收机等已由高深的概念和公式，变成实用的技术，写入实实在在的标准协议，融入到 LTE/LTE-Advanced 的产品实现当中。从某种意义上，正是全球标准的统一化进程，促进了前沿技术向工业界的辐射和渗透，而 3GPP 相对开放的运行机制能够让更多的公司厂家表达各自的观点，提出独到的解决方案。从 3GPP 参会的代表数和提案数量就可以看出，以最活跃的物理层工作组(RAN WG1)为例，每年大概有 8 次会议，每次会议有 300 多代表参加，提案超过 700 篇，邮件群组有 1 200 多人。有人比喻 3GPP 的标准提案状况犹如一个“选美”比赛，在这种“百花齐放”的氛围中，更多潜在的新技术和新思想有机会得到关注、讨论和研究，有望写入最终的协议，这些与学术上的开放环境是相辅相成的。

标准协议是具有严格约束力的技术文件，堪称技术领域的准法律文本。协议是标准化工作的最终结晶，是技术的高度浓缩，在文字表达上的准确性和严密性是其第一要著，这样才能确保开发人员能够正确无误地实现各个具体的功能模块，保证测试过程中的互操作双方不会产生理解上的歧义。协议不可能叙述标准制定的过程，无法揭示各个技术点之间的内在联系。3GPP 协议编号十分庞杂，同一种技术往往散布在多个协议文件当中，对于那些不太熟悉协议的研发人员，在理解阅读上会有较大的难度。本书的作者曾多次参加 3GPP 会议，积极推进标准提案和议案，对 3GPP 的运作方式和标准制定过程有较多的了解。所以，编写本书的第一个目的是从技术的角度，介绍 LTE/LTE-Advanced 主要功能大类的来龙去脉，希望给读者一个较为清晰的逻辑因果关系。当然，与其他标准组织一样，3GPP 尽管较为“民

主”，但毕竟不是一个完全开放的学术组织。商业经济利益和政府产业政策在一定程度上会影响标准发展的走向，甚至决定一些有潜力的技术在标准中的命运。另一方面，众多成员的参与使得 3GPP 内部产生多个暂时的利益群体，它们之间的关系微妙而且动态变化，这也给 LTE/LTE-Advanced 标准的制定进程带来一些不确定性。而本书的立足点是从丰富多彩的标准制定过程中，梳理出技术发展的主要线索以呈现给读者。因此，本书的篇章结构与标准协议的提纲组织很不一样，倒是与教科书有一定相似之处，在叙述的方式上尽量体现技术发展的内在合理性和必然性。在对具体技术的描述上，也是尽量避免直接引用协议当中的图表和公式，而是采用较为形象的插图和表格，来展示各项关键技术的实质和基本的数量关系。

无线通信从专业学科特点上讲，需要深厚的数理基础和逻辑思维。无线传播信道都遵循着麦克斯韦的波动方程公式，蜂窝通信环境的各种场景是这个基本原理的实际应用，所以无线通信所处的环境和载体是实实在在的物理世界；通信研究的对象是信息，信道的容量和频谱效率都可以由信息论来解释，而信息论是数学重要的分支——概率论在现实世界的体现；另外，概率论作为一个强有力的工具，可以有效地描述出蜂窝无线传播信道存在很多不确定性，在统计上刻画信道的特征。正因如此，无线网络的性能能够通过建立完整的模型，客观地进行各种分析、估算和计算机仿真，其研究具有系统性和完备性的特点，例如 MIMO、信道调制/解调、信道编码等方面的理论将这些领域的技术研究推到了相当的高度。众所周知，移动通信每一次大跨度的更新换代都是以性能的大幅度提高为标志的，这也是技术演进的目的所在。3GPP 对 LTE/LTE-Advanced 的性能要求做了明确的规定，包括仿真场景/参数、系统吞吐量要求、频谱效率、误块率等，都促进了系统化的研究，提高了整个行业的技术水平。正如一本数理方面的书不能缺少公式和性能曲线图表一样，本书花了相当的篇幅分析和揭示了各种先进技术能带来的性能优势，这也是编写本书的第二个目的：让读者对 LTE/LTE-Advanced 系统和技术有一个数量上的理解和把握。诚然，性能只是评定技术优劣的一个重要考量，但并非全部。高效和巧妙是另一个关键的考虑因素，工业界最终关心的还是方案的“性价比”，这方面的考虑在本书中也有阐述。另外，这里需要提醒的是，在标准化的过程中，“实现复杂度”、“后向兼容性”、“标准化工作的难度”等词语有时被作为一类托词，本身难以用科学精确的手段来研究和验证。所以本书还是尽量拨开 3GPP 中的政治因素，用客观定量的方法对 LTE/LTE-Advanced 的应用场景和涉及的技术进行分析，希望对关心技术研究的读者更有参考价值。

在 3GPP，一项技术从前沿的理念公式到标准协议的制定，其间需要经历多年的努力。这个过程的前期几年主要是学术界的研究探索；在中期阶段需要进行大量的场景分析、系统性能评估和方案框架的确定；后期牵扯到对众多信道和信令的细节设计。3GPP 除了讲“民主”，同时也讲“集中”，只有为数不多的技术能够经得起多方面的考验，通过层层筛选，最终写入标准，在业界得到推广。所以只有当研究积累达到相当深厚的程度，才能在标准化过程中占主动地位。在 LTE/LTE-Advanced 标准方面，中国企业的起步相对第二代和第三代要早，在一些关键技术，诸如 TDD-LTE、波束赋形、无线中继等领域，在 3GPP 中有较大的影响力。本书在某些章节，例如 MIMO，对无线通信理论到技术细节设计的整个过程有较展开的叙述，目的就是让读者体会到“产学研”有机结合所能带来的效果，希望在中国的无线通信业也能造就中国的“贝尔实验室”，激发出更多的既具有前瞻性，又有广阔实用前景的关键技术。

在本书的准备过程中，中兴通讯的标准预研团队给予了大力的支持。张峻峰、左志松、夏树强、孙云峰、毕峰、梁枫、李儒岳、关艳峰、邬华明、李书鹏、张文峰、张银成、杜仲达等提供了部分素材，在此表示感谢。

由于本书由编者一人完成，知识视野有一定的局限性，对于 LTE/LTE-Advanced 的理解可能有不准确、不够全面的地方。加上 LTE-Advanced 版本 11 刚刚制定，本书的写作时间较短，在技术点的阐述上难免会有不完善之处，敬请读者谅解，也希望读者能提出宝贵意见。本书编辑邮箱：liuyang@ptpress.com.cn。

编者

2013 年 3 月

目 录

第 1 章 背景介绍 1	模型	21
1.1 前几代蜂窝通信的演进..... 1	2.2.1 接入链路的大尺度信道模型	21
1.2 第四代蜂窝通信的系统要求..... 2	2.2.2 回传链路的大尺度信道模型	24
1.2.1 系统性能的要求..... 3	2.3 信道快衰落特性..... 25	
1.2.2 第四代蜂窝通信标准的发展..... 5	2.3.1 信道的时频特性..... 26	
1.2.3 性能评估方法..... 6	2.3.2 信道的空间特性..... 29	
1.3 4G 空口关键技术..... 8	2.3.3 空间信道的简化模型..... 34	
1.3.1 OFDM/OFDMA/SC-FDMA..... 8	2.4 系统仿真中的链路简化模型..... 35	
1.3.2 多进多出 (MIMO) 和协同多点处理 (CoMP)..... 8	2.4.1 链路框图描述..... 35	
1.3.3 载波聚合..... 9	2.4.2 业务信道..... 38	
1.3.4 同频小区间干扰协调..... 9	2.4.3 控制信道..... 39	
1.3.5 天线中继..... 9	参考文献..... 39	
1.3.6 ePDCCH..... 10		
1.4 本书的目的和篇章结构..... 10		
参考文献..... 11		
第 2 章 应用场景及系统性能评估模型 12	第 3 章 基本 LTE 的信道结构和性能 40	
2.1 同构网场景及模型..... 12	3.1 OFDM 原理和在 LTE 中的参数..... 40	
2.1.1 3GPP 大尺度衰落模型..... 14	3.1.1 OFDM 原理..... 40	
2.1.2 ITU 大尺度衰落模型..... 16	3.1.2 LTE 中 OFDM 有关的通用参数设计..... 41	
2.1.3 LTE-Advanced 同构网下的 CoMP 场景..... 18	3.1.3 LTE 上行的 SC-FDMA..... 43	
2.1.4 LTE MBSFN 场景..... 20	3.1.4 LTE 时频资源的划分单位..... 45	
2.2 异构网场景及大尺度信道	3.2 下行信道的设计原理和结构..... 46	

- 3.3 下行物理共享信道..... 49
 - 3.3.1 信道结构..... 49
 - 3.3.2 Turbo 码的基本原理..... 50
 - 3.3.3 LTE Turbo 码交织器..... 53
 - 3.3.4 传输块尺寸..... 53
 - 3.3.5 速率匹配..... 55
 - 3.3.6 性能分析..... 55
- 3.4 下行物理控制类信道..... 57
 - 3.4.1 PCFICH 信道结构..... 57
 - 3.4.2 PHICH 信道结构..... 58
 - 3.4.3 PDCCH 信道结构..... 59
 - 3.4.4 性能分析..... 62
- 3.5 公共类信号和信道..... 64
 - 3.5.1 小区公共参考信号 (CRS)..... 64
 - 3.5.2 多播参考信号 (MBMS RS)..... 66
 - 3.5.3 系统同步信号及性能..... 67
 - 3.5.4 广播信道及性能..... 69
- 3.6 上行信道的设计原理和结构..... 71
 - 3.6.1 设计的一般原理..... 71
 - 3.6.2 物理信道结构..... 72
- 3.7 上行物理共享信道..... 73
 - 3.7.1 信道结构..... 73
 - 3.7.2 性能分析..... 76
- 3.8 上行物理控制信道..... 77
 - 3.8.1 信道结构..... 77
 - 3.8.2 性能分析..... 79
- 3.9 上行参考信号..... 80
 - 3.9.1 解调参考信号..... 80
 - 3.9.2 探测参考信号..... 81
- 3.10 随机接入信道..... 82
- 3.11 TDD 系统..... 84
 - 3.11.1 无线帧结构..... 84
 - 3.11.2 同步信号..... 86
 - 3.11.3 上行探测参考信号的配置..... 86
 - 3.11.4 随机接入信道..... 86
- 参考文献..... 87

- 第 4 章 LTE 系统及基本性能..... 89
 - 4.1 LTE 系统简介..... 89
 - 4.1.1 系统架构..... 89
 - 4.1.2 协议层信道的映射..... 92
 - 4.1.3 LTE 控制面的基本过程..... 94
 - 4.2 资源动态调度..... 97
 - 4.2.1 调度的基本原理..... 97
 - 4.2.2 Full buffer 的调度原理..... 99
 - 4.2.3 VoIP 的调度原理..... 101
 - 4.2.4 协议的支持..... 102
 - 4.3 链路自适应..... 106
 - 4.3.1 基本概念..... 106
 - 4.3.2 标准协议的支持..... 107
 - 4.4 功率控制..... 108
 - 4.4.1 标准协议的支持..... 108
 - 4.4.2 性能..... 110
 - 4.5 下行系统性能..... 111
 - 4.5.1 开销和峰值速率..... 111
 - 4.5.2 Full buffer 性能估算..... 112
 - 4.5.3 Full buffer 性能仿真..... 113
 - 4.6 上行系统性能..... 114
 - 4.6.1 开销和峰值速率..... 114
 - 4.6.2 Full buffer 性能仿真..... 115
 - 4.6.3 VoIP 性能仿真..... 119
 - 4.7 MBSFN 的性能..... 122
 - 参考文献..... 123

- 第 5 章 先进多天线和协同多点处理技术..... 124
 - 5.1 系统模型和理论性能..... 124
 - 5.1.1 天线配置和适用场景..... 124
 - 5.1.2 MIMO 系统的一般模型..... 125
 - 5.1.3 时/频空编码的理论性能..... 127
 - 5.1.4 非预编码多天线技术的理论性能..... 127
 - 5.1.5 单用户预编码技术的理论性能..... 132
 - 5.1.6 多用户多天线技术的理论

性能	134	6.2.3 小区激活和去激活	209
5.1.7 交叉极化 8 天线的特性	138	6.2.4 TA 分组	209
5.2 下行单小区多天线技术和		6.3 载波聚合的物理层关键技术	209
标准化	139	6.3.1 下行控制信道	210
5.2.1 基础类传输模式	141	6.3.2 上行控制信道	214
5.2.2 基于小区公共参考信号		6.3.3 上行的非连续资源分配	225
的传输模式	142	6.4 版本 11 的进一步增强	226
5.2.3 基于解调参考信号的传		6.4.1 上行控制信道的增强	227
输模式	153	6.4.2 不同上/下行子帧的	
5.3 上行单小区多天线技术和标准		载波聚合	229
化	172	6.4.3 多定时提前 (MTA)	236
5.3.1 上行数据信道单用户		参考文献	238
MIMO	172		
5.3.2 上行控制信道发射分集	177	第 7 章 同频异构网小区间干扰	
5.3.3 上行 MIMO 的接收器	178	协调	240
5.4 下行协同多点处理技术和		7.1 异构网场景	240
标准化	179	7.1.1 异构网概述	240
5.4.1 下行 CoMP 的分类	179	7.1.2 异构网的性能潜力	244
5.4.2 下行 CoMP 的性能评估	181	7.1.3 微微站 (Pico node)	
5.4.3 下行 CoMP 标准中的		场景中的主要干扰	248
关键技术	188	7.1.4 家庭基站 (Femto node)	
5.5 上行协同多点处理技术和		场景中的主要干扰	250
标准化	194	7.2 LTE 版本 10 的干扰协调方法	252
5.5.1 上行 CoMP 的性能		7.2.1 异构网中的早期备选	
评估	195	方法	253
5.5.2 上行 CoMP 的关键		7.2.2 时分方法	254
技术	196	7.2.3 测量上报和信道信息	
参考文献	199	(CSI) 的反馈	255
第 6 章 载波聚合	202	7.2.4 eICIC 下的系统性能	257
6.1 载波聚合类型、部署场景和		7.3 LTE 版本 11 的同频异构网	
架构	202	技术	258
6.1.1 载波聚合类型	202	7.3.1 干扰消除技术	258
6.1.2 典型部署场景	204	7.3.2 先进接收机的链路性能	261
6.1.3 基本设计思想和协议		参考文献	264
架构	205		
6.2 载波聚合的高层关键技术	207	第 8 章 无线中继技术	265
6.2.1 服务小区的管理	208	8.1 中继的应用场景和类型	265
6.2.2 移动性管理	208	8.1.1 中继的应用场景	265
		8.1.2 中继的基本分类	266

8.1.3 类型 1 中继 268

8.1.4 类型 2 中继 270

8.2 回传链路设计与结构 271

8.2.1 回传子帧的帧结构 271

8.2.2 R-PDCCH 的设计细节 281

8.2.3 PUCCH 的改动 285

8.3 回传子帧配置和 HARQ 时序 285

8.3.1 FDD 系统 286

8.3.2 TDD 系统 289

8.4 中继系统性能 291

8.4.1 系统模型 291

8.4.2 中继系统的下行性能 293

8.4.3 中继系统的上行性能 296

8.5 中继系统高层协议简介 298

8.5.1 版本 10 中继系统架构 298

8.5.2 高层信令和基本过程 300

参考文献 300

第 9 章 增强的物理下行控制信道 302

9.1 背景介绍 302

9.1.1 版本 8 的 PDCCH 的
局限性 302

9.1.2 物理下行控制信道的
增强方向 304

9.2 ePDCCH 的基本结构 305

9.2.1 ePDCCH 与 PDSCH 的
复用方式 305

9.2.2 ePDCCH 的起始 OFDM
符号 307

9.2.3 集中式和分布式的
ePDCCH 308

9.3 ePDCCH 的细节设计 308

9.3.1 ePDCCH 的天线端口分配

和扰码技术 308

9.3.2 ePDCCH 区域中可用的
资源 311

9.3.3 eREG 和 eCCE 的定义 312

9.3.4 ePDCCH 的搜索空间 318

9.3.5 ePDCCH 集合的资源
指示 322

9.3.6 PUCCH 的 ACK/NACK
资源位置 323

参考文献 324

第 10 章 LTE 版本 12 的技术方向 326

10.1 异构网的演进 326

10.1.1 同频异构小区的动态
协作 326

10.1.2 热点和室内异构小区
的增强 328

10.2 大规模天线技术 333

10.2.1 有源天线的形态和
性能 334

10.2.2 信道模型 334

10.2.3 空间信道信息 (spatial
CSI) 的测量和反馈 335

10.3 终端直通通信技术 336

10.3.1 同伴发现 337

10.3.2 直通通信 339

10.4 其他的技术 340

10.4.1 低成本的 MTC 终端 340

10.4.2 LTE 的覆盖增强 342

参考文献 343

缩略语 345

第 1 章

背景介绍

1.1 前几代蜂窝通信的演进

蜂窝或移动通信 (Cellular or Mobile Communications) 是无线通信的一大种类。通过无线电波传送信息, 始于 19 世纪末的马可尼 (Guglielmo Marconi), 从他首次成功实现跨大西洋的无线通信, 迄今已有 100 多年历史。蜂窝通信的概念源自 AT&T 贝尔实验室 1968 年的发明, 基本思想是把大范围区域分割成多个类似蜂窝正六边形状的小区, 小区间复用频谱资源, 从而大大地增加了整个地区所能使用的频谱资源总数。1973 年, 蜂窝通信原理首次在摩托罗拉的试验系统中得到了实现, 拉开了移动通信发展的序幕。在不到 40 年的时间, 蜂窝通信迅猛发展, 全球范围内的渗透率已超过 50%, 其技术也经历了 4 代的演进, 如图 1-1 所示。

第一代蜂窝通信基于模拟幅度调制 (Amplitude Modulation), 与传统的铜线电话类似, 资源按照固定频率划分 (频分多址, Frequency Division Multiple Access (FDMA))。相应的标准有贝尔实验室开发的 Advanced Mobile Phone System (AMPS)。从 1980 年

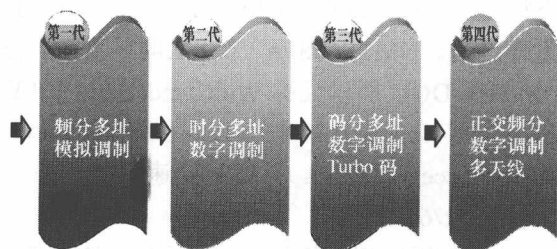


图 1-1 蜂窝通信的技术演进

到 1995 年, AMPS 在北美、以色列和澳大利亚等地区和国家广泛采用。模拟制式下的语音信号没有经过信源压缩, 缺乏信道编码的纠错保护, 发射功率也无有效控制, 所以干扰十分严重, 资源利用率很低, 系统容量相当有限。再加上模拟器件的制造和集成相对困难, 终端的硬件昂贵而且笨重, 俗称“大哥大”。那时只有极少数用户买得起手机和付得起打手机电话的服务费用。第一代蜂窝通信由于都是模拟制式, 不太容易准确衡量其性能, 但大致换算下来每条链路能支持的速率与 28~56 kbit/s 调制解调器相仿。

第二代蜂窝通信采用数字调制, 语音经过信源压缩成为数字信号, 并加入信道编码进行纠错, 而且运用功率控制, 使得信道的传输效率大大提高, 系统容量也有很大提升。第二代蜂窝通信主要的业务是语音通话, 最典型的代表是欧盟国家主导制定的 GSM (Global System of Mobile communications) 标准, 由于其技术精炼实用, 终端和系统的实现成本较低, 所以当前在全球范围内最为普及。GSM 制式对无线资源进行时分多址 (Time Division Multiple Access, TDMA), 每个用户占用的频带较窄, 只有 200 kHz。与第一代蜂窝通信系统一样, 为降低邻近

小区间频率复用可能造成的干扰，以保证小区边缘的通话性能，GSM 系统通常将相邻的 7 个或 11 个小区组成一簇，簇内各小区的频率不能重复，频率复用只能以簇为单位。为支持数据业务，GSM 又增强成为 GPRS 和 EDGE，峰值速率可达 153.6 kbit/s 和 236.8 kbit/s，平均速率也在 80~100 kbit/s 左右。第二代蜂窝通信还有另外一种制式：高通公司（Qualcomm Inc.）的 IS-95，主要在北美部署。IS-95 是第一个使用码分多址（Code Division Multiple Access, CDMA）的直接频率扩展（direct spread spectrum）的商用标准，可以被看作是第三代蜂窝通信的前奏。

码分多址技术的大规模应用是在第三代蜂窝通信。通过频率扩展，信道的抗干扰能力大大增强。频率扩展本身具有良好的统计特性，对于语音服务这类多用户，而且每个用户低速率传输的情形尤为适合。所以，相邻小区可以完全复用频率，从而提升了系统容量。系统容量的提高还很大程度上得益于信道编码的突破，1993 年 Turbo Codes 的出现使信道链路性能逼近香农极限容量（Shannon Capacity），因此迅速地在第三代蜂窝通信中得到应用。国际电信联盟（International Telecommunication Union, ITU）对第三代蜂窝通信系统有性能最低要求，但由于门槛定得较低，远远低于几大标准宣称的指标，故很少引用。标准组织对第三代蜂窝通信系统的性能评估有讨论，形成了一些评估方法，但总的来说还不够全面和统一。

cdma2000/EV-DO 和 UMTS/HSPA 是第三代蜂窝通信的两大标准。cdma2000/EV-DO 主要由高通公司发起制定，载波频带宽度大约 1.2 MHz，相应的国际标准组织是 3GPP2。该标准在北美、韩国、中国等国家和地区广泛使用。cdma 2000 侧重语音服务，而 Evolution Data Optimized (EV-DO) 的设计着眼于高速数据业务，在 CDMA 中加入了时分复用，其峰值速率对于 1.2 MHz 的单载波，下行可达 3.1 Mbit/s，上行可达 153 kbit/s；对于 5 MHz 的三载波，下行可达 14.7 Mbit/s。UMTS/HSPA 的国际标准组织是 3GPP，其中欧洲的厂商和运营商起着重要作用。UMTS/HSPA 已经在世界范围广泛使用。其载波频带宽度为 5 MHz，宽于 cdma 2000/EV-DO，所以又称 Wideband CDMA (WCDMA)。与 cdma 2000 到 EV-DO 的演进路线相类似，(Universal Mobile Telecommunications System, UMTS) 偏重语音服务，而 (High Speed Packet Access, HSPA) 偏重高速数据业务，版本 6 的 HSPA 的峰值速率下行为 14.4 Mbit/s，上行为 5.76 Mbit/s。

第三代蜂窝通信还有一套标准：TD-SCDMA (Time Division Synchronous CDMA)，主要由中国公司主导，属于 3GPP 标准的一部分。TD-SCDMA 在中国有大规模的部署。TD-SCDMA 的上下行公用一个频段，以时间划分，发射和接收不连续。由于公用频段，上下行传播信道有很强的互易性 (channel reciprocity)，十分有利于实现波束赋形以提高系统容量。上行/下行公用频段无需成对频谱的要求，给运营商更大的部署自由，而且系统的上/下行时隙资源比例有多种选择，可以按照业务量的需求合理配置，从而增加整个系统的频谱利用率。

第三代蜂窝通信还包括一些没有被广泛采纳的技术，例如朗讯贝尔实验室分出来的 Flarion 公司开发的 FLASH-OFDM，是业界较早将正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 用于移动通信的技术，曾试图在 IEEE 国际通信组织进行标准化。Flash-OFDM 也可以看作是第四代蜂窝通信的一个预演。

1.2 第四代蜂窝通信的系统要求

对数据业务的支持从第二代蜂窝通信就有，如 GPRS。第三代蜂窝通信中的 EV-DO 和

HSPA 也是针对数据业务的。但真正意义的大容量和高速数据业务只有到了第四代蜂窝通信才得到充分体现，第四代蜂窝通信是全 Internet Protocol (IP) 的系统，全部是分组交换业务 (Packet Switched Service)，语音全部通过 Voice over Internet Protocol (VoIP) 技术进行传输，达到数据和语音的完全融合。另外，国际电信联盟将第四代蜂窝通信标准统一归入 IMT-Advanced，强调相应的标准应该在世界范围内广泛采用，对备选标准的系统性能和评估方法做出了明确的要求，力求评估过程统一和客观，具有可比性。

无线网络的部署在第四代蜂窝通信中体现出多样性，场景比以前的系统更加复杂，包括异构网，具有各自的独特性。因此场景的定义、模型建立和参数设置成为关键技术研究的重要部分。

1.2.1 系统性能的要求

以往蜂窝通信系统和标准对系统性能的要求定得较为宽泛，偏重强调峰值速率，而对所占的频率资源，以及用户的平均速率、小区边缘速率等指标并没有严格限定；部署场景也较单一，郊区宏站的室外用户是常见的场景。而第四代蜂窝通信考虑了多种场景，对每一种场景的性能指标都有明确要求。

传输速率通常定义为频谱效率，即每赫兹每秒在一个基站和一个终端之间正确传输的比特数，这里的带宽资源和时间资源中包括了各种控制信令、参考信号、波形前缀等的开销，因此反映了整体设计的综合效果。系统仿真考虑的是多用户多小区的环境，所以确切地讲，频谱效率是指每个小区在单位时间和单位带宽下的吞吐量。ITU 的主要评估场景有室内 (Indoor)、微蜂窝 (Micro)、宏蜂窝 (Macro) 和高速移动 (fast moving)。室内场景的基站密度较高，用户呈热点分布，且移动性小；微蜂窝基站的覆盖介于室内场景和宏蜂窝之间。注意，以上的场景基本上还是属于同构网，室内场景有些例外，但也是相对隔绝的单个小区。在 2008 年 6 月订立 IMT-Advanced 系统的性能要求^[1]时，考虑的新技术大都是针对同构网的。因为当时业界对异构网的研究尚处于初级阶段，无法对其性能提出具体的要求。

IMT-Advanced 对下行要求的频谱效率如图 1-2 所示，纵坐标 (频谱效率) 是以 10 为底的对数坐标。可见峰值效率远远高于平均效率和小区边缘效率，分别差一个和两个数量级。IMT-Advanced 的性能指标没有标明天线的配置，但是收/发天线的数目不能超过 8 根，而且在考虑峰值速率时，基站侧的收/发天线最多为 4 根，终端侧的接收天线最多为 4 根，发射天线最多为两根。

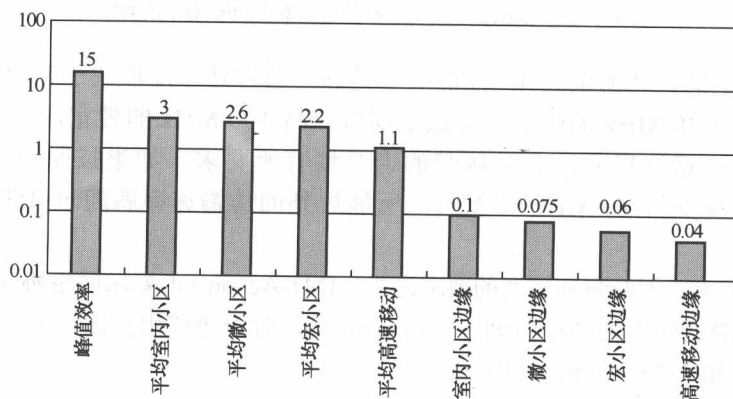


图 1-2 IMT-Advanced 对下行频谱效率 (bit/s/Hz) 的要求

在 IMT-Advanced 的性能要求之上，3GPP 对 LTE-Advanced 提出了更高的性能需求^[2]，图 1-3 所示的是对 3GPP Case 1 场景的下行要求，3GPP 的 Case 1 场景与 ITU 的城市宏蜂窝场景（Urban Macro）相近。突出点是峰值频谱效率为 30 bit/s/Hz，这意味着在 64-QAM 调制下，下行需要支持 8 层的空间信道复用（8 × 8 MIMO）。性能指标对不同的天线配置有不同的要求。

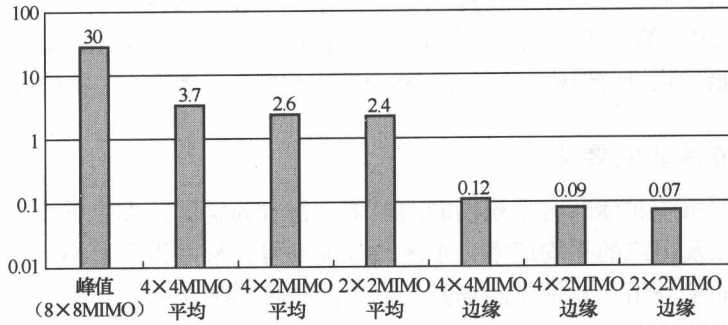


图 1-3 3GPP LTE-Advanced 对下行频谱效率 (bit/s/Hz) 的要求, Case 1 场景

相比下行，上行因为终端发射功率受限，对其要求也有所降低，特别是峰值频谱效率，如图 1-4 和图 1-5 所示。同下行的情况类似，LTE-Advanced 的上行性能要求高于 IMT-Advanced，尤其体现在能支持层数为 4 的空间信道复用，使得峰值频谱效率达到 15 bit/s/Hz。

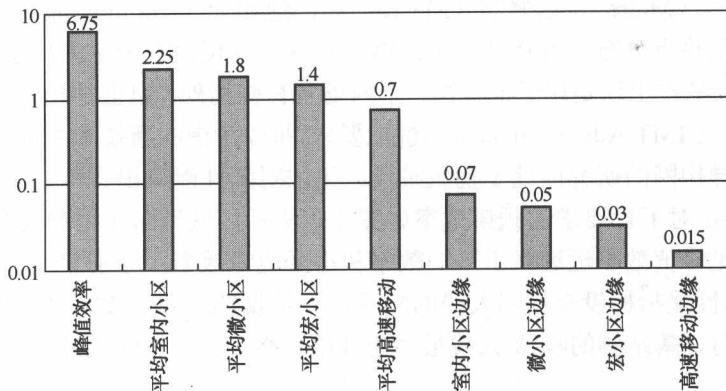


图 1-4 IMT-Advanced 对上行频谱效率 (bit/s/Hz) 的要求

频谱效率反映的是资源的利用率，而一个链路的总体速率还取决于带宽。IMT-Advanced 要求终端最小支持 40 MHz 的带宽，并鼓励研究支持 100 MHz 的带宽，从而实现真正意义的大宽带通信。注意这里并没有对频带的连续性有所要求。如果按照下行峰值频谱效率 15 bit/s/Hz，当终端支持 67 MHz 带宽时，所能达到的传输速率就超过 1Gbit/s，与光缆的速率有可比性。

除了对传输速率、吞吐量和带宽的要求之外，IMT-Advanced 要求网络协议控制面的时延，例如歇息状态到激活状态的切换时间在 100 ms 以内。对于协议用户面，在低负载和小数据分组的情形下，传输时延在 10 ms 以内。

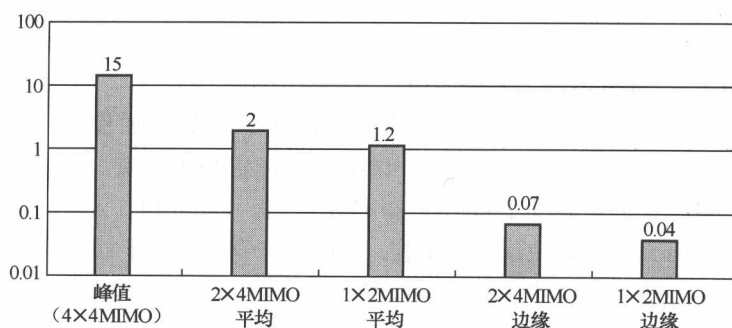


图 1-5 3GPP LTE-Advanced 对上行频谱效率 (bit/s/Hz) 的要求, Case 1 场景

1.2.2 第四代蜂窝通信标准的发展

每个工业标准的发展都具有一定的延续性。延续性一方面可以减小对已有系统的冲击,有利于平滑演进;另一方面通过尽可能地沿用已有的产品实现,可以降低研制开发的风险。因此,第三代蜂窝通信的每一个主流标准在朝向第四代迈进时都有一个相应的演进版本。在 3GPP2 标准组织, cdma2000/EV-DO 演变成 Ultra Mobile Broadband(UMB), 仍然以 Qualcomm 主导; 在 3GPP 标准组织, UMTS/HSPA 演变成 Long Term Evolution (LTE) /LTE-Advanced; TD-SCDMA 与 LTE 融合生成 TD-LTE, 从属于 LTE。以上的标准主要由传统移动通信厂商和运营商推动, 除此之外, 在 IEEE 标准组织, 英特尔公司 (Intel) 联合有线电视运营商和众多中小规模的厂家, 推出了 802.16 系列的蜂窝通信标准, 通常称为 WiMAX 协议^[3]。需要指出的是从第三代到第四代的演进, 从技术角度上都是较为“革命性”的, 从标准协议方面上, 与以前系统的共性并不是很多, 这里的“延续性”更是从标准组织关系和厂家利益集团的角度而言。

UMB 的技术起始于 Qualcomm 对 IEEE 802.20 的研究。802.20 由 Flarion 公司发起, 其目的是对 Flash-OFDM 技术进行标准化。Qualcomm 在兼并 Flarion 之后, 基本上用其自主研究的成果取代了 Flash-OFDM 技术, 并写入 IEEE 802.20 的标准草案^[4], 与 WiMAX 形成竞争。之后由于 IEEE 802.20 标准组织忙于处理内部纠纷, 失去标准时间窗口。之后 Qualcomm 将此技术正式命名成 UMB^[5], 在 3GPP2 协同朗讯科技 (Lucent)、北电 (Nortel) 和三星 (Samsung) 等公司制定技术细节, 2007 年底已基本完成。但由于 Verizon 等几家大的运营商缺乏兴趣, Qualcomm 被迫于 2008 年停止对 UMB 的研发, 这条 cdma2000/EV-DO 向 UMB 演进的路线宣告中止。

LTE 的标准化工作始于 2004 年, 研究阶段持续至 2006 年。第一期标准的版本编号是 8 (Release 8), 于 2008 年完成。由于 UMB 标准化工作的停止和 WiMAX 标准的边缘化, 更多的厂家和运营商加入了 LTE 标准的制定工作, 参会人数和提案数有很大增加, 逐渐成为世界上最主流的 4G 蜂窝通信标准。版本 8 LTE 的设计性能还不能完全达到 IMT-Advanced 的要求, 所以从 2008 年起, 3GPP 开始了对 LTE-Advanced 标准化的研究。作为一个重大的技术迈进, LTE-Advanced 标准的版本编号是 10 (Release 10), 其研究阶段持续至 2009 年底, 协议的制定于 2011 年上半年结束。当前标准化的是 LTE-Advanced 的修订版, 改动相对较小, 版本号是 11 (Release 11)。

TDD-LTE 尽管与通常的 FDD-LTE 相比有些独特之处, 且融入了 TD-SCDMA 的一些关

键技术，但是 TDD-LTE 在标准化的制定和产业链的发展方面一直保持与 LTE/LTE-Advanced 的步调总体一致，已经有机地成为 LTE 中的一部分。

WiMAX 发端于无线局域网，可以看成是 Wi-Fi 向广域蜂窝通信的一个延伸，技术上仍然以低速移动终端为主要场景，但还带有相当多的 Wi-Fi 的技术痕迹。WiMAX 早在 2007 年就形成标准 (IEEE 802.16 e)，时间上较 LTE 和 UMB 占有市场先机，起初 Sprint 等运营商计划广泛部署，但由于 Sprint 本身的经营状况不佳，再加上产业联盟过于松散，商业模式不够健全，WiMAX 目前主要由一些小的运营商在考虑部署，在未来相当长的时间里还会继续发展。

在 2012 年的国际电信联盟大会上，LTE/LTE-Advanced(包括 TDD-LTE)和 WiMAX(IEEE 802.16 m) 被认定为第四代蜂窝通信的标准，纳入 IMT-Advanced，许可在全球范围内部署。

1.2.3 性能评估方法

蜂窝通信区别于其他无线电通信的主要特点是蜂窝通信划分多个小区进行无线资源复用，从发展之初就以系统角度考虑性能。在第一代和第二代蜂窝通信技术中，无线资源是静态配置的，而且以语音业务为主，业务速率恒定，不需要链路动态自适应和快速的功率控制。因此信道的长期平均统计特性，例如大尺度衰落，就足以用来估计接收端的平均信干噪比 (Signal to Interference Noise Ratio, SINR)。链路仿真的结果一般以统计的方式映射到系统仿真当中，例如要达到一定的误比特率所需的平均 SINR。相应系统仿真都是静态的，以计算为主，计算量也不大。

动态的系统仿真评估始于 2002 年，当时针对 EV-DV 标准的研究，3GPP2 标准组织订立了一套系统的评估方法^[6]。它规定了仿真的系统应包括 19 个基站，57 个扇区，并采用复制翻转 (Wrap around) 的手段消除网络区域的边缘效应。在每个扇区分布多个终端。除此之外，该评估方法的几大特点是：①信道建模包含大尺度衰落和小尺度衰落；②引入新的链路性能模型用于系统仿真；③多种业务类型的统计建模。小尺度衰落和新的链路模型的引入，使得仿真能从毫秒级的时间粒度上反映系统的行为，为第三代蜂窝通信中的新技术，例如链路自适应、混合自动请求重发 (Hybrid Automatic Repeat Request, HARQ)、快速的功率控制等，提供了有效的研究手段。也因为如此，动态的系统仿真的运算量比第二代的静态仿真的要大很多，有时需要专门的服务器群来完成代码的运行。

多天线的研究促进了空间信道建模的工作，2004 年 3GPP2 与 3GPP 联合组成了一个 Spatial Channel Model (SCM) 临时课题组 (Ad-hoc group)，对空间信道模型的参数选择、天线类型等进行了深入研究，所建议的模型^[7]不仅用于系统仿真，也可用于链路仿真。稍后，欧盟成立了 WINNER 项目，在 SCM Ad-hoc group 研究的基础上，进一步完善系统模型，增加部署场景。对于传统的第三代蜂窝通信，信道建模只涉及信道的时域特性。而空间信道建模还需刻画空间结构，涉及多个收发天线，仅仅就信道而言，仿真的复杂度和运算量成倍地增加。

IMT-Advanced 的系统仿真评估方法^[8]是基于第三代蜂窝通信系统的评估方法，加上欧盟 WINNER 联合研究项目对空间信道的建模。与 3G 时代不同的还有一点，CDMA/EV-DO 和 UMTS/HSPA 都是码分多址的接入技术，信号扩频到整个带宽上，所以只关心信道的时域特性，如多径下各个衰落径的幅度和时延，无需考虑频域的特性。而 IMT-Advanced 包括 LTE/LTE-Advanced 采用正交频分多址 (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)，需要刻画信道小尺度衰落中的频域特性，仿真运算量增大。