

高等学校电子信息类“十三五”规划教材
中国电子教育学会高教分会推荐教材



西安电子科技大学立项教材

Long Term Evolution for UMTS

LTE移动通信系统

李晓辉 付卫红 黑永强 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校电子信息类“十三五”规划教材
中国电子教育学会高教分会推荐教材
西安电子科技大学立项教材

LTE 移动通信系统

李晓辉 付卫红 黑永强 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书以 LTE 技术为主线,对 LTE 的关键技术和规范展开了深入的探讨。书中首先介绍 LTE 所涉及的 OFDM、MIMO 和链路自适应等关键技术;在此基础上重点阐述 LTE 技术规范及工作过程,包括小区搜索过程、上/下行物理层传输过程以及随机接入过程等;最后介绍 LTE-Advanced 及第五代(5G)移动通信系统的基本思想和关键技术。

本书各章均配有小结与思考题,方便学生课后复习与总结;书中还穿插多个知识拓展,以补充学生相关通信知识。

本书可作为通信相关专业研究生及高年级本科生的教材,还可作为通信网络和无线通信等相关领域工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

LTE 移动通信系统/李晓辉,付卫红,黑永强编著.

—西安:西安电子科技大学出版社,2016.8

高等学校电子信息类“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5606-4191-1

I. ① L… II. ① 李… ② 付… ③ 黑… III. ① 无线电通信—移动网—高等学校—教材 IV. ① TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 174013 号

策 划 李惠萍

责任编辑 曹 锦 马武装

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2016 年 8 月第 1 版 2016 年 8 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 16

字 数 377 千字

印 数 1~3000 册

定 价 29.00 元

ISBN 978-7-5606-4191-1/TN

XDUP 4483001-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

前 言

随着现代通信技术的飞速发展,全球移动用户数量有了大幅增加。虽然第三代(3G)移动通信系统在无线通信的性能上得到了很大提高,但其在应对市场挑战和满足用户需求等领域还有很多局限。用户和市场都在呼吁传输速率更快、时延更短、频带更宽以及运营成本更低的网络诞生。

LTE(Long Term Evolution,长期演进)是由 3GPP(The 3rd Generation Partnership Project,第三代合作伙伴计划)组织制定的 UMTS(Universal Mobile Telecommunications System,通用移动通信系统)长期演进标准,于 2004 年 12 月在 3GPP 多伦多会议上正式立项并启动。LTE 具有传输速度快、延迟率低、移动性好的特点,可以带给用户全新的体验。

LTE 系统的主要目标是设计一种高性能无线接口标准,在 20 MHz 频谱带宽提供下行 100 Mb/s、上行 50 Mb/s 的峰值速率,改善小区边缘用户的使用性能,提高小区容量,降低系统时延,支持 100 km 半径的小区覆盖,能够为 350 km/h 高速移动用户提供大于 100 kb/s 的接入服务,支持成对或非成对频谱,并可灵活配置 1.4~20 MHz 多种带宽等。

为了实现上述目标性能,LTE 系统引入了 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing,正交频分复用)和 MIMO(Multi-Input Multi-Output,多输入多输出)等关键技术,显著提高了频谱效率和数据传输速率。LTE 系统网络架构更加扁平化、简单化,降低了网络节点和系统复杂度,从而减小了系统时延,也降低了网络部署和维护成本。

本书共 11 章。为了便于对 LTE 技术规范的学习,在介绍 LTE 技术规范之前,本书在第一章至第四章对 LTE 相关技术进行了剖析,目的是使读者对相关技术有充分的理解和认识。第一章叙述了 LTE 的发展;第二章描述了 OFDM 技术,包括单载波调制与多载波调制、OFDM 的基本原理、OFDM 系统的抗多径原理等;第三章对 MIMO 多天线技术做了介绍,包括空间分集技术、MIMO 空时编码技术与空间复用技术等;第四章阐述了链路自适应及无线资源调度,包括自适应编码调制、HARQ、OFDM 和 MIMO 链路自适应技术以及多用户资源调度等。上述内容为介绍后续内容提供了必要的基础。

第五章至第九章主要介绍了 LTE 技术规范,是本书的核心部分,包括 LTE 物理层概述、LTE 小区搜索和随机接入过程、物理层上行传输过程和下行传输过程等。第五章对 LTE 物理层的工作频带与带宽、物理/逻辑与传输信道、帧结构及双工方式等进行了描述;第六章介绍了 LTE 小区搜索,主要包括小区搜索流程、同步信号时频结构、同步序列设计、SCH/BCH 发送分集等内容;第七章讲述物理层上行传输过程,描述了不同信道的传输过程,并详细阐述了上行信道编码、PUSCH 与 PUCCH 传输过程等;第八章介绍了物理

层下行传输过程；第九章讲述 LTE 随机接入过程，包括随机接入概况、基于竞争的随机接入流程、随机接入时频结构、随机接入基带信号生成等。

本书在最后两章还对移动通信新技术展开研究，其中，第十章对 LTE-Advanced 技术增强做了详细介绍，包括载波聚合技术、中继技术、多点协作技术等；第十一章介绍了第五代(5G)移动通信新技术，包括网络体系架构、空接口技术、大规模 MIMO 技术、毫米波无线通信技术、同时同频全双工技术等。

本书是在多年来对 LTE/LTE-Advanced 以及 5G 移动通信技术研究的基础上，结合当前移动通信领域国内外最新技术编写而成的。全书内容丰富，叙述深入浅出。通过本书的学习，读者不仅可以了解 LTE 基础原理和技术规范，而且可以通过学习移动通信的新技术，为日后从事下一代移动通信系统的研发奠定理论与技术基础。

本书由李晓辉、付卫红和黑永强编著。感谢参与本书材料整理和校对工作的杨冬华、袁靖雅、蒙丹凤、黄丝等研究生，感谢西安电子科技大学通信工程学院各位领导和老师给予的帮助和支持。本书的出版得到了西安电子科技大学研究生院精品教材建设项目的资助和支持，在此表示感谢！

由于作者水平有限，加上时间仓促，书中不足之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

2016 年 4 月

目 录

第一章 LTE 的发展	1	第三章 MIMO 多天线技术	35
1.1 移动通信发展历程	1	3.1 MIMO 的引入	35
1.2 LTE 概述	4	3.2 空间分集技术	36
1.3 3GPP 演进系统架构	5	3.2.1 分集技术概述	36
1.3.1 分组核心网	5	3.2.2 多天线分集技术	39
1.3.2 共享无线接口	6	3.2.3 分集接收合并方法	39
1.3.3 基站的组成	7	3.3 MIMO 空时编码技术	41
1.3.4 其他接入技术	9	3.3.1 空时网格码	42
1.4 LTE 关键技术	9	3.3.2 空时分组码	42
1.5 移动通信技术的发展	10	3.3.3 酉空时码	46
1.5.1 LTE-Advanced	10	3.3.4 差分空时码	47
1.5.2 下一代移动通信技术	13	3.4 MIMO 空间复用技术	47
本章小结	15	3.4.1 D-BLAST	48
思考题 1	15	3.4.2 V-BLAST	49
第二章 OFDM 技术	16	3.4.3 T-BLAST	52
2.1 单载波调制与多载波调制	16	3.5 MIMO 预编码技术	53
2.2 OFDM 的优缺点	17	3.5.1 单用户 MIMO 预编码算法	53
2.3 OFDM 基本原理	19	3.5.2 多用户 MIMO 预编码算法	56
2.4 OFDM 的 IFFT 实现	20	3.6 MIMO 与 OFDM 技术的结合	58
2.5 OFDM 系统的抗多径原理	21	3.7 MIMO 其他相关技术	59
2.6 OFDM 系统中的信道估计技术	22	3.7.1 虚拟 MIMO	60
2.6.1 基于导频的信道估计方法	22	3.7.2 认知 MIMO 技术	61
2.6.2 信道盲估计方法	26	本章小结	61
2.7 OFDM 中的同步技术	30	知识拓展 MIMO 信道模型	62
2.7.1 同步误差对 OFDM 的影响	30	思考题 3	63
2.7.2 同步的一般过程	31	第四章 链路自适应及无线资源调度	64
2.8 MC-CMDA(OFDM-CDMA)技术	32	4.1 信道状态信息	64
本章小结	34	4.2 自适应编码调制	66
思考题 2	34	4.3 HARQ 链路自适应技术	68

4.4 OFDM 链路自适应技术	70	思考题 5	104
4.4.1 注水算法及功率分配	70	第六章 LTE 小区搜索	105
4.4.2 OFDM 自适应调制	72	6.1 小区搜索流程	105
4.5 MIMO 自适应调制技术	75	6.1.1 小区搜索基本流程	106
4.6 多用户资源调度	77	6.1.2 小区选择过程	107
4.6.1 常用多用户资源调度算法	77	6.2 同步信号时频结构	109
4.6.2 MIMO-OFDM 资源调度	78	6.3 同步序列设计	112
本章小结	79	6.3.1 主同步信号序列	112
思考题 4	80	6.3.2 辅同步信号序列	113
第五章 LTE 物理层概述	81	6.3.3 系统信息	114
5.1 工作频带及带宽	81	6.4 SCH/BCH 发送分集	118
5.1.1 LTE 频带划分	81	本章小结	120
5.1.2 LTE 带宽分配	83	思考题 6	120
5.2 物理信道、传输信道、逻辑信道及 其映射关系	84	第七章 物理层上行传输过程	121
5.2.1 物理信道	85	7.1 上行传输概述	121
5.2.2 传输信道	86	7.2 上行信道编码	121
5.2.3 逻辑信道	87	7.3 SC-FDMA	125
5.2.4 信道映射关系	88	7.4 PUSCH 传输过程	127
5.3 帧结构	89	7.5 PUCCH 传输过程	131
5.3.1 第 1 类帧结构	89	7.6 上行参考信号	139
5.3.2 第 2 类帧结构	89	7.7 时间提前量与上行链路定时	141
5.4 资源块及其映射	92	7.8 上行调度与链路自适应	142
5.4.1 下行链路的时隙结构	92	本章小结	144
5.4.2 物理资源块和虚拟资源块	93	思考题 7	144
5.4.3 下行物理信道资源块映射	94	第八章 物理层下行传输过程	145
5.4.4 上行时隙结构和物理资源块映射	95	8.1 物理层下行传输一般过程	145
5.5 双工方式	96	8.2 PDSCH 传输过程	146
5.5.1 时分双工方式	96	8.2.1 调制	146
5.5.2 频分双工方式	97	8.2.2 层映射	146
5.5.3 双工技术特点对比	98	8.2.3 预编码	148
5.5.4 帧结构和链路的差异	99	8.3 PDCCH 传输过程	152
本章小结	99	8.3.1 下行控制信息(DCI)	153
知识拓展 LTE 信道模型	99	8.3.2 PDCCH 的有效载荷	160
		8.3.3 PDCCH 物理层过程	160
		8.4 PCFICH 及 PHICH 传输过程	161

8.4.1 PCFICH	161	10.1.6 载波聚合中的随机接入过程	197
8.4.2 PHICH	163	10.1.7 载波聚合中的资源管理	200
8.5 PBCH 传输过程	163	10.2 LTE-A 中的中继技术	203
8.6 下行参考信号	164	10.2.1 中继的原理及特点	203
8.7 OFDM 信号的产生	166	10.2.2 中继分类	205
8.8 下行资源调度及链路自适应	167	10.2.3 3GPP 中继系统框架	205
8.9 限制小区间干扰的方法	169	10.2.4 中继双工方式	208
8.10 eMBMS	171	10.3 LTE-A 中的多点协作技术	211
本章小结	173	10.3.1 多点协作基本概念	211
思考题 8	173	10.3.2 多点协作分类	211
第九章 LTE 随机接入过程	174	10.3.3 多点协作传输方案	213
9.1 随机接入概况	174	本章小结	215
9.1.1 应用场景	174	思考题 10	216
9.1.2 随机接入过程分类	174	第十一章 第五代移动通信新技术	217
9.2 基于竞争的随机接入流程	175	11.1 第五代移动通信概述	217
9.2.1 随机接入前导	176	11.2 网络体系架构	218
9.2.2 随机接入响应	179	11.3 空中接口技术	219
9.2.3 调度请求	179	11.4 大规模 MIMO 技术	221
9.2.4 竞争决策	180	11.4.1 大规模 MIMO 概述	221
9.2.5 物理层与上层间的交互模型	181	11.4.2 大规模 MIMO 关键技术	222
9.3 随机接入时频结构	181	11.4.3 大规模 MIMO 的预编码技术	223
9.3.1 随机接入前导码结构	181	11.5 毫米波无线通信技术	225
9.3.2 非同步随机接入的时频结构	183	11.5.1 毫米波通信概述	225
9.3.3 同步随机接入的时频结构	186	11.5.2 单用户混合波束成形	226
9.4 随机接入基带信号的生成	187	11.5.3 多用户混合波束成形	227
9.4.1 前导序列生成	187	11.6 同时同频全双工技术	232
9.4.2 基带信号生成	190	11.6.1 灵活双工概述	232
本章小结	190	11.6.2 全双工系统干扰分析	233
思考题 9	191	11.6.3 全双工系统中的自干扰消除技术	234
第十章 LTE-A 技术增强	192	本章小结	236
10.1 LTE-A 中的载波聚合技术	192	知识拓展 毫米波信道模型	236
10.1.1 载波聚合技术的引入	192	思考题 11	237
10.1.2 载波聚合的分类	193	附表 缩略词表	238
10.1.3 载波聚合实现方式	195	参考文献	246
10.1.4 控制信道设计	196		
10.1.5 载波聚合方式	197		

第一章 LTE 的发展

本章给出了 UMTS(Universal Mobile Telecommunications System)长期演进(LTE, Long Term Evolution)的过程,从第一代移动通信系统开始,介绍了移动通信及 LTE 的由来;然后描述了 LTE 的技术指标、体系架构和关键技术,说明了 LTE 的目标及特点。此外,还对 LTE-Advanced(简称 LTE-A)和第五代移动通信系统进行了简要介绍。章末给出了本章小结。

1.1 移动通信发展历程

移动通信系统出现于 20 世纪 80 年代中期,最初是第一代(1G, The First-Generation)模拟移动通信系统,例如美国的高级移动电话系统(AMPS, Advanced Mobile Phone System)和北欧移动电话系统(NMT, Nordic Mobile Telephone)。

第二代(2G, The Second-Generation)移动通信系统是无线数字系统,它具有比第一代模拟系统更强的鲁棒性和更高的频谱效率。主要的 2G 技术包括全球移动通信系统(GSM, Global System for Mobile communications)、CDMAOne(Code Division Multiple Access One, 第一代码分多址)、时分多址接入系统(TDMA, Time Division Multiple Access)和个人数字蜂窝网(PDC, Personal Digital Cellular)。其中, GSM 在欧洲和全球范围的其他多数国家开发和使用; CDMAOne 也称 IS-95, 主要用于亚太地区、北美和拉丁美洲; TDMA 系统采用 IS-136 北美标准, 由于 TDMA 是 1G 标准 AMPS 的演进, 因此该系统也称为数字高级移动电话系统(D-AMPS, Digital Advanced Mobile Phone System); PDC 是日本专用的 2G 标准。

表 1.1 描述了上述四种主流 2G 系统参数的对照, 给出了各自的无线基本参数(例如无线调制、载波间隔和无线信道结构)以及服务级别的参数(例如初始数据速率和语音编码方案等)。

表 1.1 主要 2G 系统参数对照表

指标	GSM	CDMAOne	TDMA	PDC
工作频段	900 MHz	800 MHz	800 MHz	900 MHz
调制方式	GMSK	QPSK/BPSK	QPSK	QPSK
载波间隔	200 kHz	1.25 MHz	30 kHz	25 kHz
载波调制速率	270 kb/s	1.2288 Mc/s	48.6 kb/s	42 kb/s

续表

指标	GSM	CDMAOne	TDMA	PDC
每载波业务信道	8	61	3	3
主要接入方式	TDMA	CDMA	TDMA	TDMA
初始数据速率	9.6 kb/s	14.4 kb/s	28.8 kb/s	4.8 kb/s
语音编码方案	RPE-LTP	CELP	VSELP	VSELP
语音速率	13 kb/s	13.3 kb/s	7.95 kb/s	6.7 kb/s

2G 系统的演进也称 2.5G，即在语音基础上又引入了分组交换业务。GSM 对应的 2.5G 是通用分组无线业务(GPRS, General Packet Radio Service)系统。CDMAOne 可以进一步分为 IS-95A 和 IS-95B，IS-95A 是 2G 标准，而 IS-95B 是 IS-95A 的 2.5G 演进标准。

EDGE 是 Enhanced Data rate for GSM Evolution 的缩写，也是一种从 GSM 到 3G 的过渡技术。EDGE 主要是在 GSM 系统中采用了多时隙操作和 8PSK 调制技术，使每个符号所包含的信息是原来的 3 倍，其性能优于 GPRS 技术。

随着 2G 技术的不断发展，用户迫切地需要全球统一的无线技术。定义第三代(3G, The Third-Generation)全球移动通信系统标准的根本目的就是为无线用户提供一种简单的全球移动解决方案，避免在公共蜂窝通信中使用大量的多模终端，降低由此带来的严重的无线资源和能量浪费，从更广泛的业务层面改善用户体验。3G 移动通信系统在不同环境下期望的数据速率如下：在乡村室外无线环境为 144 kb/s，在城市或郊区室外无线环境为 384 kb/s，在室内或小范围室外无线环境为 2048 kb/s。

主要的 3G 标准包括 WCDMA(Wideband Code Division Multiple Access, 宽带码分多址系统)、CDMA 2000 和时分同步码分多址(TD-SCDMA, Time Division-Synchronous Code Division Multiple Access)。

WCDMA 是第三代合作伙伴计划(3GPP, 3rd Generation Partnership Project)提出的 3G 系统标准，也称通用移动通信系统(UMTS, Universal Mobile Telecommunications System)。WCDMA 是基于码分多址(CDMA, Code Division Multiple Access)的方案，使用高速编码的直接序列扩频。每个用户在单信道的速率可达 384 kb/s，在专用信道上的理论最大速率为 2 Mb/s，同时支持基于分组和电路的应用并且改进了漫游能力。WCDMA 于 2001 年在日本开始商用，其名称为自由移动多媒体接入(FOMA, Freedom Of Mobile multimedia Access)，并于 2003 年在其他国家商用。WCDMA 的无线接口与 GSM/EDGE 完全不同，但其结构和处理过程是从 GSM 继承而来的，与 GSM 后向兼容，终端能够在 GSM 和 WCDMA 网络间无缝移动。

3GPP 还接纳了我国的时分同步码分多址技术，有的文献也将其称为 TDD 模式的 UMTS 标准。

北美 CDMA 2000 是由 IS-95 发展而来的。CDMA 2000 的一个主要分支称为演进数据和语音(1xEV-DV, Evolution Data and Voice)，迄今为止没有大规模商用。另外一个分支是演进数据优化(1xEV-DO, Evolution Data Optimized)，支持高速分组数据业务传送，在 CDMA 2000 的发展中占据重要的地位。

高速分组接入(HSPA, High Speed Packet Access)是对 WCDMA 进一步的增强,包括高速下行链路分组接入(HSDPA, High Speed Downlink Packet Access)和高速上行链路分组接入(HSUPA, High Speed Uplink Packet Access)。HSDPA 于 2005 年底开始商用化。HSDPA 中引入了新的调制方式——正交幅度调制(QAM, Quadrature Amplitude Modulation),理论上支持 14.4 Mb/s 的峰值速率(使用最低信道保护算法),而用户实际体验到的数据速率可以达到 1.8 Mb/s 甚至 3.6 Mb/s。HSDPA 采用共享无线方案和实时(每 2 ms)信道估计技术来分配无线资源,能够实现对用户的数据突发进行快速反应。此外,HSDPA 实现了混合自动重传(HARQ, Hybrid Automatic Repeat reQuest),这是一种在靠近无线接口处实现的快速重传方案,能够快速适应无线传输信道特征的变化。HSUPA 是一种与 HSDPA 相对应的上行链路(从终端到网络)分组发送方案。HSUPA 不是基于完全共享信道发送的,每一个 HSUPA 信道实际上具有自己专有物理资源的专用信道。HSUPA 的共享资源由基站来分配,主要是根据终端的资源请求来分配上行 HSUPA 的发射功率。HSUPA 理论上可以提供高达 5.7 Mb/s 的速率,当移动用户进行高优先级业务传输时,还可以使用比通常情况下分配给单个终端更多的资源。

此外,3GPP 还提出了 HSPA+,也称 HSPA 演进。HSPA+是 HSDPA 和 HSUPA 技术的增强,目标是在 UMTS 长期演进(LTE, Long Term Evolution)成熟之前,提供一种 3G 后向兼容演进技术。由于采用了大量新技术,例如,多输入多输出(MIMO, Multiple Input Multiple Output)技术和高阶调制(例如下行采用 64QAM、上行采用 16QAM),HSPA+有望在 WCDMA系统的 5 MHz 带宽上达到与 LTE 相同的效率。同时,HSPA+结构上也做了改进,降低了数据发送时延。HSPA+被认为是当前 HSPA 和 LTE 间的过渡技术,与 3G 网络后向兼容,便于运营商平滑升级网络,在 LTE 网络进入实际商用前提高网络性能。

1xEV-DO 将逐步发展到 Revision C,它是 CDMA 2000 的演进版本。北美 CDMA 技术不是本书介绍的重点,感兴趣的读者可以参考 3GPP2 组织发布的 C.S0084-000“UMB 空中接口规范”来了解关于 Revision C 的细节。

表 1.2 给出了主要 3G 系统参数对照表。

表 1.2 主要 3G 系统参数对照表

	WCDMA/HSPA	CDMA2000	TD-SCDMA
多址方式	FDMA+CDMA	FDMA+CDMA	FDMA+TDMA+CDMA
双工方式	FDD	FDD	TDD
工作频段	上行: 1920~1980 MHz	上行: 1920~1980 MHz	上行: 1880~1920 MHz
	下行: 2110~2170 MHz	下行: 2110~2170 MHz	下行: 2010~2025 MHz
载波带宽	5 MHz	1.25 MHz	1.6 MHz
码片速率	3.84 Mc/s	1.2288 Mc/s	1.28 Mc/s
峰值速率	下行: 14.4 Mb/s	下行: 3.1 Mb/s	下行: 2.8 Mb/s
	上行: 5.76 Mb/s	上行: 1.8 Mb/s	上行: 384 kb/s
接收检测	相干检测	相干检测	联合检测
越区切换	软、硬切换	软、硬切换	接力切换

HSPA 的引入使得移动网络由语音业务占统治地位的网络转换为数据业务占统治地位的网络。数据使用占统治地位是由占用大量带宽的便携式应用推动的, 这些应用包括互联网和内联网的接入、文件共享、用于分发视频内容的流媒体业务、移动电视以及交互式游戏。此外, 视频、数据和语音业务的集成正在进入移动市场。目前, 家庭和办公室的移动业务正在逐步取代传统的固定网络语音和宽带数据业务, 这对网络数据的容量和效率提出了更高的要求。因此, 3GPP 提出了比 HSPA 具有更高性能的 LTE 及其高级标准 LTE-Advanced (简称 LTE-A), 以改善用户的使用性能。本书后续章节将围绕 LTE 技术及规范展开细致、深入的研究。

综上所述, 移动通信的发展历程如图 1.1 所示。

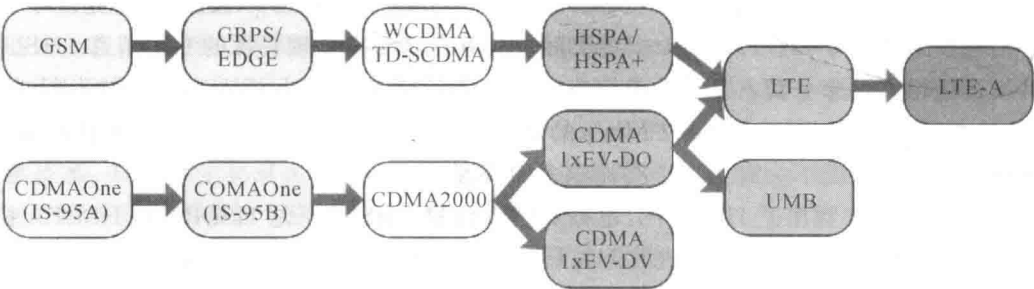


图 1.1 移动通信发展历程

1.2 LTE 概述

LTE 是由 3GPP 组织制定的通用移动通信系统 (UMTS, Universal Mobile Telecommunications System) 的长期演进标准, 于 2004 年 12 月在 3GPP 多伦多会议上正式立项并启动。

LTE 的主要目标是设计一种高性能无线接口, 也称之为演进的陆地无线接入网 (E-UTRAN, Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network)。通过引入正交频分复用 (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 和多输入多输出 (MIMO, Multiple Input Multiple Output) 等关键技术, 显著提高了频谱效率和数据传输速率。在 20 MHz 带宽、 2×2 天线配置、64QAM 情况下, LTE 的理论下行最大传输速率为 201 Mb/s, 除去信令开销后, 最大传输速率大概为 150 Mb/s。但根据实际组网以及终端能力限制, 一般认为 LTE 下行峰值速率为 100 Mb/s, 上行峰值速率为 50 Mb/s。

LTE 支持多种带宽分配, 包括 1.4 MHz、3 MHz、5 MHz、10 MHz、15 MHz 和 20 MHz 等, 且支持全球主流 2G/3G 系统频段和一些新增频段, 因此其频谱分配更加灵活, 系统容量和覆盖也显著提升。LTE 系统网络架构更加扁平化、简单化, 降低了网络节点和系统复杂度, 从而减小了系统时延, 也降低了网络部署和维护成本。此外, LTE 系统支持与其他 3GPP 系统互操作。

根据双工方式不同, LTE 系统分为 FDD (Frequency Division Duplexing)-LTE 和 TDD (Time Division Duplexing)-LTE, 两者的主要区别在于空中接口的物理层。FDD 系统空中接口上行与下行采用成对的频段接收和发送数据; 而 TDD 系统上行和下行则使用相同的频段在不同的时隙上传输数据。与 FDD 双工方式相比较, TDD 有着较高的频谱利用率。

综上所述，LTE 系统的性能指标可以用表 1.3 来表示。

表 1.3 LTE 系统的性能指标

频谱指标	传输指标	传输时延	移动性	其他指标
支持 1.4/3/5/10 /15/20 MHz 带宽； 灵活使用现有或新增频谱； 支持对称和非对称频谱； 频谱效率下行达到 HS-DPA 的 2~4 倍，上行达到 HSUPA 的 2~3 倍	20 MHz 带宽的情况下支持上行 50 Mb/s，下行 100 Mb/s	在非过载的条件下，LTE 规范的用户数据时延小于 5 ms，端到端时延小于 150 ms	在 120 km/h 下性能良好； 在高速 (350 ~ 500 km/h) 情况下，用户能够保持连接性	支持现有 3GPP 和非 3GPP 系统的互操作； 支持增强型广播业务和多播业务； 支持增强的 IMS 和核心网，取消电路域，所有业务均在分组域实现

1.3 3GPP 演进系统架构

在无线接入技术不断演进的同时，3GPP 还开展了系统架构演进(SAE, System Architecture Evolution)的研究。LTE 的分组核心网称为 EPC(Evolved Packet Core)，采用全 IP 结构，旨在帮助运营商通过采用无线接入技术来提供先进的移动宽带服务。EPC 和 LTE 合称演进分组系统(EPS, Evolved Packet System)。

本节从分组核心网、全共享的无线接口、基站的组成和对其他接入类型的支持等方面对网络结构进行阐述。

1.3.1 分组核心网

为了理解 3GPP 系统架构演进的主要发展趋势，我们先从 2G 网络开始回顾一下无线网络演进的主要过程。

2G GSM 蜂窝网络最初是为语音和电路交换(CS, Circuit Switching)业务而设计的，这样的网络结构相对简单，主要由接入网络(AN, Access Network)和电路交换核心网络域(CS 域)两部分组成。接入网络部分包括无线接口以及支持无线相关功能的网络节点和其他接口。在早期 2G GSM 系统中，无线接口是专门为语音或低比特速率电路交换数据设计的。电路交换核心网络域支持基于电路交换的业务(包括呼叫建立、认证和计费)以及与传统公共交换电话网(PSTN, Public Switched Telephone Network)的互通。

随着 IP 和 Web 业务的出现，2G GSM 网络逐步演进到能够支持分组数据传输方式的阶段，例如 GPRS 和 EDGE。这一阶段里，系统在接入网中引入了支持分组发送和共享资源分配的方案。此外，它还增加了与 CS 域并行的分组交换核心网络域(PS 域)。PS 域与 CS 域具有类似的作用，支持分组发送(包括认证和计费)以及与公共或私有 Internet(或 IP)网络的互通。

早期 3G UMTS 网络结构与 2G 网络或多或少有相同的地方，它们都包括电路和分组核心网络。随着网络结构的发展，UMTS 逐步在 PS 域上增加了一个新的域：IP 多媒体子系统(IMS, IP Multimedia Subsystem)。IMS 的主要目标是制订一个新的标准，在 3GPP 的各种无

线网络间采用统一的方法来实现 IP 业务(例如“一键通”、“呈现业务”或“即时消息”)的互操作。由于 IMS 是在 Internet 工程任务委员会(IETF, Internet Engineering Task Force)提出的一种灵活的协议——会话发起协议(SIP, Session Initiation Protocol)的基础上开发的, IETF 是一个专门制订 Internet 标准的国际组织, 因此 IMS 业务具有较好的互操作性。此外, IMS 标准通过信令和媒体网关支持 VoIP(Voice over IP), 并且能够与传统 PSTN 进行互通。

在图 1.2 中, 除了 PS 和 IMS 外, CS 域仍然是 3G 核心网络结构中的一部分。3G 网络结构中保留 CS 域的主要原因是仍然需要支持电路交换语音业务和基于 H324M 的视频电话。

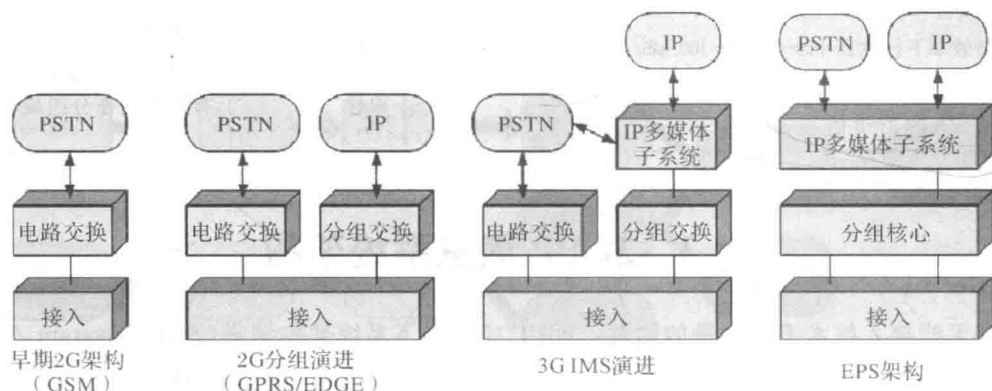


图 1.2 系统结构演进

虽然 IMS 在综合业务方面具有很强的吸引力, 但是由于现有 IMS 机制不支持与 CS 网络间语音业务的无缝移动, 因此传统网络运营商没有把 IMS 作为一个面向所有业务的公共平台(包括语音、实时和非实时业务)。

EPS 具有一个明确的目标, 就是在简单的公共平台上综合所有业务。EPS 的主要组成包括分组优化接入网络和简单的核心网络。

分组优化接入网络可以有效支持基于 IP 的非实时业务以及类似电路交换的需要恒定时延和恒定比特速率传输的业务; 简单的核心网络仅由一个分组域组成, 支持所有的 PS 业务(可以基于 IMS), 能够与传统的 PSTN 互通。

由于在 PS 域上支持所有应用(包括大多数实时受限应用), 因此 EPS 结构不再包括 CS 域。显然, EPS 结构中需要引入一个网关节点, 该节点可以作为 IMS 结构的一部分, 使得 IP 业务能够转换到基于电路交换的 PSTN 进行传输。

简化系统结构的目的是在 LTE 标准化过程中维持新、旧系统间呼叫的连续性。

1.3.2 共享无线接口

随着核心网络结构不断向分组或“全 IP”结构发展, 如何为分组数据提供有效的无线传输方案已成为接入网络中至关重要的问题。在早期 3G 版本中, 用户使用的是专用资源, 系统需要为用户分配固定的资源。LTE 全部采用共享无线资源分配方案, 在一组共享高速比特速率无线管道上合并所有无线承载, 从而最大化资源利用率。于是, LTE 可以在共享的无线资源上支持所有业务, 例如网页浏览等交互式业务以及语音等时延受限业务。

图 1.3 所示为专用和共享资源分配。

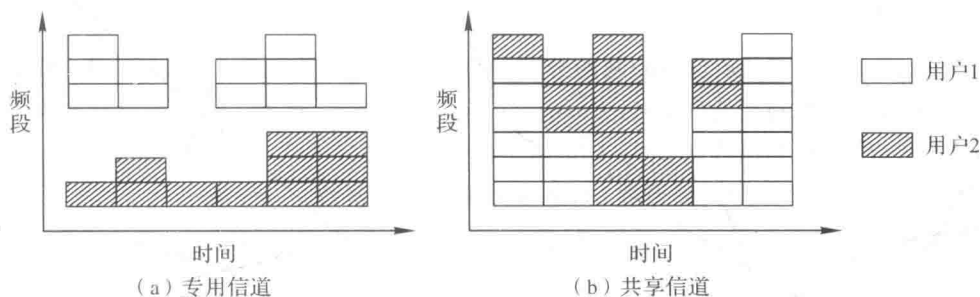


图 1.3 专用和共享资源分配

LTE 与 UMTS 陆地无线接入网(UTRAN)无线接口不同, UTRAN 接口可以在同一小区内分配专用资源(通常是 CS 域的比特速率有保证的业务)和 HSDPA 高速共享信道。

LTE 的全共享无线接入演进采用和 WiFi(IEEE 802. 11)或 WiMAX(IEEE 802. 16)等无线网络标准相似的机制, 是一种更为简单的方法。但是, 这种无线接入方案需要专用的无线资源管理方案, 以确保可以满足所有实时业务的比特速率和传输时延的需求。

1.3.3 基站的结构

LTE 涉及的主要设备包括基站(eNodeB, evolved Node Base station)和用户设备(UE, User Equipment)。为了理解 LTE 的数据传输过程, 图 1.4 给出 LTE 基站的结构示意图。

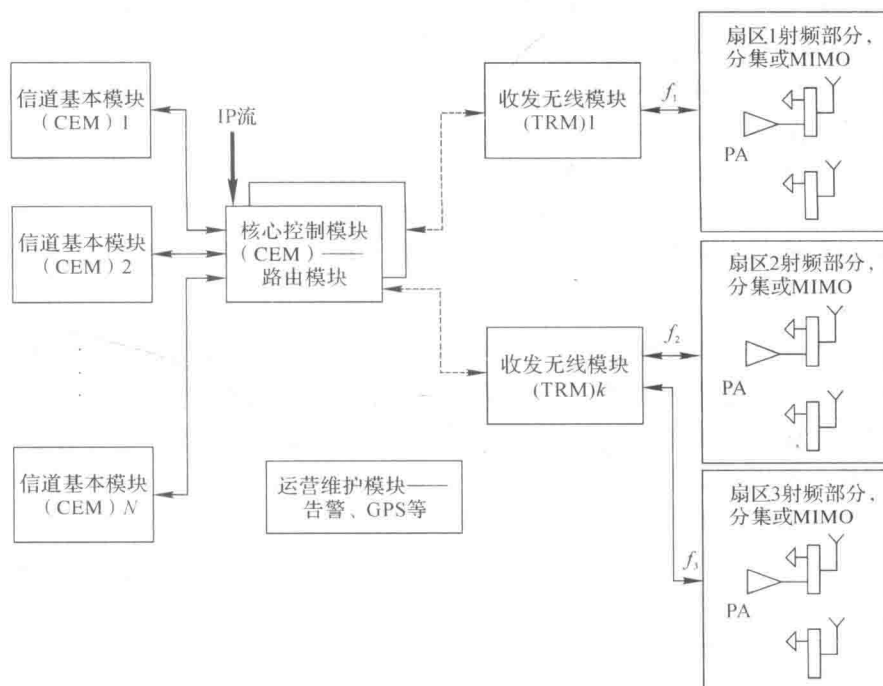


图 1.4 LTE 基站结构示意图

基站通过光纤、高数据速率的同步传输模块(STM1, Synchronous Transfer Module-1), 甚至是传统的 E1/T1 等 2 Mb/s 物理接口连接到骨干网。基站通过支持 IP 分组传输协议从服务网关接收用户数据信息。

1. 下行链路传输

在下行链路传输中，来自核心网的分组(经服务网关)首先到达 IP 路由模块，IP 路由模块通常也称为核心控制模块(CCM, Core Control Module)。接着，每一个分组被转发到调制解调器——信道基本模块(CEM, Channel Element Module)，该模块能够支持各种物理信道(导频、公共信道和专用信道等)上所有类型的物理编码。

CEM 模块能够并行处理 N 个信道(流)，在每一个信道上实现编码，形成无线信号，包括：OFDM 调制、插入循环前缀等。

每个信道基本模块把各扇区的信号交给路由模块，通过路由模块再连接到相关扇区的收发无线模块(TRM, Transceiver Radio Module)。根据不同的结构，收发无线模块可以管理一个给定频率的扇区(如图 1.4 中的扇区 1)，或者管理多个不同频率的扇区(如图 1.4 中的扇区 2 和扇区 3)。

收发无线模块有时也被称为“信道收发器(Channelizer)”，其主要目标是对信号进行过采样，并使用脉冲滤波器成形，把整个信号限幅并调制到频率为 f_i (参见图 1.4, $i=1, 2, 3$) 的载波上。无线操作模块能够处理多个所需的频带。

有时，几个扇区共享一个功率放大器(PA, Power Amplifier)，这就可以把 PA 的输出依次通过微波设备分配到每一个扇区。

2. 上行链路传输

在上行链路中，每一个收发无线模块可以从一个或多个扇区接收信号。例如，我们可以令一个收发无线模块负责处理一个给定频率的信号。每一扇区接收的信号常常来自几个分集天线。MIMO 或波束成形天线阵列。这些信号经过放大、滤波并通过模/数转换器将其转换成数字信号。

接着，数字信号发送到核心控制模块，并路由到信道基本模块(CEM)，信道基本模块中包括了对每个信号进行解调的各处理过程(如删除循环前缀、FFT 等)。

信号通过信道基本模块解调后，通过支持分组传输协议的路由模块发送到 IP 网络。

3. 分布式基站

移动通信市场的发展趋势是朝着产品更加易于安装(重量轻、功率消耗小等)、具有更少的工程限制等方向演进，于是设备制造商提出了分布式基站的概念，参见图 1.5。采用分布式基站时，收发无线模块(TRM)模块和射频(RF)部分安装在室外，它们通过光纤或 RF 链路连接到核心模块(CCM)，这种方式称为射频拉远；具有远端放大等功能的室外设备称为射频拉远头(RRH, Remote Radio Head)。

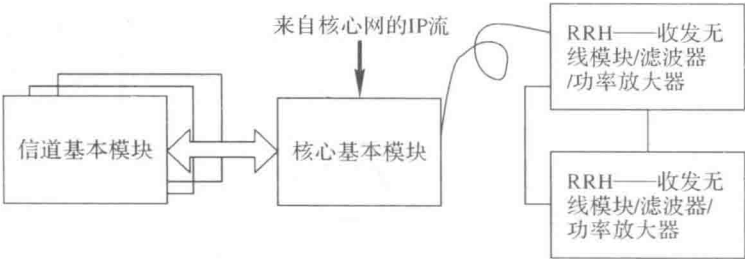


图 1.5 分布式基站方案

1.3.4 其他接入技术

自从 21 世纪以来, IEEE 提出了许多基于无线局域网(WLAN)或无线城域网(WMAN)的高速、高性能无线接口, 包括众所周知的 WiFi 系列(例如 IEEE 802. 11b、IEEE 802. 11 和 IEEE 802. 11n)以及 WiMAX 系列(IEEE 802. 16)等。

WiFi 和 WiMAX 可以提供接近甚至高于 UTRAN 和 LTE 的目标数据速率, 如表 1. 4 所示, 但是这些技术与全网系统方案还有很大差距。IEEE 规范主要研究无线接口的数据链路层, 没有给出更高层的规范, 例如网络结构和接口、用户管理、业务以及网络服务质量策略等。

表 1. 4 IEEE 无线接入技术

无线技术	空中接口峰值速率/(Mb/s)
IEEE 802. 11b	11
IEEE 802. 11g	54
IEEE 802. 11n	300
IEEE 802. 16	70

由于 WiFi 等无线技术越来越流行, 3GPP 体系不得不把它们列入候选的接入技术, 并把它们作为 3GPP 分组网络框架的一部分, 同时充分利用已经广泛使用的高速无线芯片和设备。

自从 3G 出现至今, 如何实现与 WiFi 接入技术的互通就已经成为一个令人感兴趣的话题。无疑, 支持不同接入网络间的无缝移动性也是 LTE 的一个发展方向。

1.4 LTE 关键技术

LTE 采用了多项新技术, 这些技术包括 OFDM 技术、MIMO 技术、链路自适应技术(如自适应编码调制(AMC, Adaptive Modulation and Coding))、混合自动重传请求(HARQ, Hybrid Automatic Repeat reQuest)以及小区干扰协调技术(ICIC, Inter Cell Interference Coordination)等。

1) OFDM 技术

OFDM 把系统带宽划分成多个相互正交的子载波, 在多个子载波上并行传输数据; 各个子载波的正交性是由基带快速傅里叶反变换(IFFT, Inverse Fast Fourier Transform)实现的。由于子载波带宽较小(15 kHz), 多径时延将导致载波间干扰, 破坏子载波之间的正交性。为此, 可在 OFDM 符号间插入保护间隔, 通常采用循环前缀来实现。LTE 下行采用正交频分多址接入技术(OFDMA), 上行采用单载波频分多址接入技术(SC-FDMA, Single Carrier FDMA)。

2) MIMO 技术

LTE 下行支持 MIMO 技术进行空间维度的复用。空间复用包括单用户 MIMO(SU-MIMO)模式和多用户 MIMO(MU-MIMO)模式, 两者都支持通过预编码的方法来降低或