



LTE教程： 原理与实现

— 孙宇彤 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

014007735

TN929.5
323

LTE 丛书之学好 LTE 系列

LTE 教程：原理与实现

孙宇彤 编著



TN929.5

323

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING



北航

C1694574

内 容 简 介

《LTE 丛书之学好 LTE 系列》是专为 LTE 学习而打造的,内容脱胎于作者深受好评的 LTE 公开课程,并加以完善和增补,循序渐进,娓娓道来,非常适合 LTE 学习。

本书是《LTE 丛书之学好 LTE 系列》的开篇,浓墨重彩地介绍了 LTE 的两大关键技术:OFDM 和多天线技术的原理以及实现方法。在 OFDM 原理部分揭开了 OFDM 技术不为人知的许多内情,其中的能量正交概念会让读者耳目一新。在 OFDM 实现部分,还会发布很多颠覆性的内容,比如 IFFT 算法不是生成 OFDM 信号的唯一算法,等等。在多天线原理部分,分门别类介绍了三大多天线技术的特点。在多天线实现部分,作者定量分析了 LTE 中各种 TM 发射模式的差异,详细介绍了 LTE 中的多天线处理过程。作者的眼光并不局限在 LTE 上,本书同时还穿插介绍了各种移动通信系统和 WLAN 技术,让读者具有更全面的技术视野。

本书适合从零起点到已经对 LTE 技术有所了解的人士阅读,并且可以作为 LTE 自学和培训的教材。

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

LTE 教程:原理与实现 / 孙宇彤编著. —北京:电子工业出版社, 2014.1

(LTE 丛书之学好 LTE 系列)

ISBN 978-7-121-21915-3

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 274348 号

策划编辑:宋 梅

责任编辑:宋 梅

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

装 订:北京中新伟业印刷有限公司

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:787×980 1/16 印张:14.5 字数:325 千字

印 次:2014 年 1 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:49.00 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

——从此，学好 LTE！

这是一本专为 LTE 学习而写的书，目标就是帮助大家学好 LTE。

在筹划这本书的时候，正赶上江南百年未遇的酷暑，几乎天天最高气温破 40℃。不过，在通信业界，通信人学习 LTE 的热情决不比大自然的热度逊色：大自然的热度还有退烧的时候，但是我们可以明显感到，LTE 学习的热情一浪高过一浪，一年更胜一年。

作为【空中接口学园】和【读懂通信】网站的创办人，我在业界比较早就介入到 LTE 学习中，发表过不少 LTE 相关书籍的点评、导读，撰写过 LTE 的自学指南，分享过 LTE 视频公开课。因此，有不少网友问了我许多关于 LTE 学习的问题，其中典型的问题是：“学习 LTE 有没有捷径可走？哪本书比较适合初学者阅读？”

对于第一个问题，我想起了两千多年前的一个故事，当时埃及的托勒密国王曾经问《几何原本》的作者欧几里得，学习几何有没有捷径可走。“抱歉，陛下！在几何学里，没有专为国王铺设的大道。”欧几里得答道，“学习几何是没有什么捷径可走的。”

同样，学习 LTE 也是没有什么捷径可走的。LTE 技术的难度系数很高，学习 LTE 的道路并不轻松。如果有谁告诉你，LTE 的学习很轻松，那就是一个谎言。因此，学习 LTE 需要学习者足够的专注，并投入精力，这样才能学好 LTE。

虽然没有捷径可走，作为 LTE 学习的先行者，我可以告诉大家，哪些是 LTE 学习的正路、哪些是 LTE 学习的弯路，哪些是 LTE 学习的天王山，哪些是 LTE 的点缀。这样，虽然没有捷径，但是学习路上也不至于落入陷阱，耽误行程。

对于第二个问题，坦率地说，这也是我为什么要写这本书的原因。虽然在本书的“代序：LTE 自学指南 2014 版”中我推荐了 5 本 LTE 学习的必读书，但在这些书里，基本上没有对 LTE 基本原理的介绍和描述。换言之，没有打基础就直接登堂入室了，对很多初学者来说，还是有很多遗憾的。

在 LTE 中，技术原理的天王山就是 OFDM 和多天线，大王 OFDM，小王多天线。我阅读过很多 LTE 书籍，对这两王，要么避之不及，要么语焉不详。有的写出一大堆公式，仿佛看了公式就能理解，更有甚者，其理解完全是错误的。

很多人觉得，不理解 OFDM 和多天线，也不会妨碍自己从事 LTE 相关工作。但是，一直处于知其然不知其所以然的状态，肯定不是有追求的技术人的心愿。我在最初学习 LTE 时，也经历了对 OFDM 和多天线似是而非的过程，只有在彻底理解 OFDM 和多天线后，才发现对 LTE 原理的理解真正上了一个台阶。因此，我也愿意在这本书里，分享我对 OFDM 和多天线等关键技术原理的理解。

说起来，我与电子工业出版社和宋梅编辑非常有缘。早在 2007 年我在《WCDMA 无线网络设计》一书中，就非常早地提到了 LTE 技术，可以算是为本书埋下了一个伏笔，而《WCDMA 无线网络设计》的出版社和编辑就是本书的出版社和编辑。

这本书对我来说，也是非常有意义的。在出版了9本移动通信技术书籍后，我又开始了新的写作形式：教程。这本教程是我在2013年LTE公开课内容基础上的总结和扩充，可以说是先有了蛋，再去找鸡，与以前写的书有明显的区别。

在写这本教程的时候，我把握了这样一些原则：

(1) 重点突出

LTE技术千头万绪，要想面面俱到，写起来很难，读者看起来很累。况且市面上已经出版了很多LTE的书籍，各种参考书已经是汗牛充栋了。因此本教程另辟蹊径，就围绕LTE技术的两大难点展开，把LTE技术的这笔糊涂账说清楚，讲明白，让读者看过后，能从云里雾里到“一览众山小”。

不过读者也不用担心教程内容不全面，这本教程只是《LTE丛书之学好LTE系列》的第一本，后续的教程还将探讨LTE的信道结构和信息处理过程、LTE网络的部署与实施、LTE无线网络的调度机制及运作方式、EPC的结构、功能及运作方式。

(2) 线索清晰

与以前的著作一样，我非常重视写作线索，这本教程更进一步，不仅是章节之间紧密联系，一环扣一环，达到循序渐进的效果，而且在各个小节之间，我还加入了串联的内容，让读者阅读时有一种一气呵成、顺水推舟的感觉，能够一口气从头看到尾。简言之，看书就像在参与培训一样。

当然，读者还可以到【学好LTE】网站：<http://www.readhere.com.cn/lte>，去观看相关的培训课程，这样学习起来会相得益彰。

(3) 语言流畅

由于这本教程来源于培训的讲稿，教程中保留了培训课程中比较多的口语化描述以及通俗化的术语，希望给读者一种原汁原味的感觉。我希望这本教程不仅好读、易读，还要能朗读，朗朗上口。

以上三点，有没有做到，就请读者来评判了。

教程中的思考题供学有余力的读者使用，读者可以把思考题答案以及LTE学习中遇到的疑难问题，发布在【空中接口学园】论坛：<http://www.pch.com.cn/bbs>，我将及时点评与回复。

读者在学习过程中有任何问题，想要与我联系的话，可以关注我的微博和微信，都是“读懂通信”。读者也可以访问【读懂通信】网站：<http://www.readhere.cn/bs>，深入阅读相关的技术文章。

本书由孙宇彤编著，汪洲参与了本书的编写工作，孙沛然、杨慧瑞、汪中位、张秋娥协助了本书的编写工作，在此一并表示感谢。

最后，预祝各位读者都能从此学好LTE。

孙宇彤

2013年盛夏

代序：LTE 自学指南 2014 版

【前言】

本指南是《LTE 的学习指南》的升级版，由【读懂通信】和【空中接口学园】联合发布。

作者允许在注明来源后转载全文，作者保留对本文的修订权限，转载内容不得删减。

【为什么要学习 LTE？】

LTE 是未来 5 年通信技术的主流，在全球范围看，是继 GSM、WCDMA 后的又一统治性的移动通信技术。

由于中国的国情，WCDMA 的发展不尽如人意，但是 LTE 在中国的发展将会突破 WCDMA 的局限，被各大移动运营商普遍采用。

目前国内 LTE 的部署已经展开，学好 LTE，对现在以及未来的通信行业技术人员来说，不但有面向未来的作用，也具有现实的意义。

【为什么要自学 LTE？】

既然 LTE 技术是未来移动通信技术的主流，从现在起，学习 LTE 就是必然的了。

学习 LTE 有很多方式，参加培训、与同事交流以及自学。很显然，LTE 目前还是非常新的技术，大家周围能找到的专家比较少，与同事交流的机会并不多，而参加培训的可能性也不大，在这种情况下，自学 LTE 就成为一个比较可行的学习方式。

【如何高效地自学 LTE？】

如果没有合适学习方法，自学 LTE 其实是一个很艰难的过程。LTE 的技术机制与很多人熟悉的 GSM 大相径庭，如果贸然转向 LTE，收获的未必是成果。

因此，高效地自学 LTE 第一步，就是认真地阅读本自学指南，然后按照自学指南介绍的学习路径和学习方法，逐步深入地学习。

【学 LTE 还是学 LTE-A？】

这是 LTE 自学遇到的第一个问题：该学 LTE 还是学 LTE-A 呢？

大家知道 LTE 的技术一直在发展，从 R8、R9 的 LTE 一直发展到 R10、R11、R12 的 LTE-A，而且还在发展。

如果作为实施人员，我的建议是学习 LTE 就足够了，LTE-A 都是些锦上添花的东西，都是建立在 LTE 基础上的，目前商用的可能性不大，没有必要花时间琢磨 LTE-A。

作为实现人员，开发产品的功能会涉及 LTE-A。我的看法是 LTE 是 LTE-A 的技术基础，不了解和掌握 LTE，很难做好 LTE-A，因此 LTE 是必备的。而 LTE-A 涉及的方向很多，届时可能只需要关注其中的一个方向，比如 CA、Relay 或者 CoMP。

【LTE 的学习内容】

LTE 的学习内容包含哪些方面呢？

LTE 的学习应该以 eNB 为中心, 分为以下 4 大部分。

A. 空中接口的物理层: 内容包括 OFDM、SC-FDMA、MIMO、HARQ、调度、帧结构、参考信号、PDCCH、PUCCH。

B. 空中接口的链路层和网络层: 内容包括 RRC、PDCP、RLC、MAC。

C. S1 和 X2 接口: 内容包括 S1、X2、SCTP。

D. SAE: 内容包括 GTP、QoS。

相对而言, A 是学习的难点, A 和 B 是学习的重点。其中, 搞终端的学 A+B 就可以了, 搞网络的需要 A+B+C。D 部分供有余力的读者扩展思路。

熟悉 WCDMA 和 HSPA+ 的读者, 学习 A 的效率可以提升 30%; 熟悉 WiMAX 的读者, 学习 A 的效率可以提升 20%。熟悉 WCDMA 的读者, 学习 B 和 C 的效率可以提升 50%。

【LTE 有哪些参考书?】

LTE 的学习离不开参考书, 前面说的 4 大部分内容都有相关的参考书, 比如:

A 部分的参考书可以说是百花齐放, 种类很多, 例如, 《LTE-UMTS 长期演进理论与实践》、《3G 演进: HSPA 与 LTE》、《LTE 权威指南》、《LTE 技术原理与系统设计》、《TD-LTE 技术原理与系统设计》。

B 和 C 部分的主要参考书有《LTE-UMTS 长期演进理论与实践》和《UMTS 中的 LTE》。

D 部分的主要参考书有《3GPP 系统架构演进 (SAE) 原理与设计》。

【学 LTE 该从什么书看起?】

对于初学者来说, 一本好的教材胜过很多本参考书, 这里向大家郑重推荐《LTE 教程: 原理与实现》。

这本书是专为 LTE 学习而打造的, 内容脱胎于作者深受好评的 LTE 公开课程, 并加以完善和增补, 循序渐进, 娓娓道来, 非常适合初学者学习。

这本书浓墨重彩地介绍了 LTE 的两大关键技术: OFDM 和多天线, 在 OFDM 原理部分揭开了 OFDM 技术不为人知的许多内情, 提出的能量正交概念也会让读者耳目一新。在 OFDM 实现部分, 还会有很多颠覆性的内容, 比如 IFFT 算法不是生成 OFDM 的唯一算法, 让初学者为之一振。在多天线部分, 分门别类介绍了三大多天线的形态, 定量分析了各种 TM 发射模式的差异, 并指出 MIMO 其实只是 DEMO, 强调了可用度非常重要的观点。

总之, 本书会帮助读者深刻理解 OFDM 和多天线技术, 即使已经学习过 LTE 技术的人, 推荐也应该看一遍。

【学 LTE 该看什么参考书?】

目前 LTE 的参考书越来越多, 但是并不是所有的参考书都适合初学者的, 对于初学者来说, 精选一些参考书对提高学习效率非常重要, 另外这些书又该重点看哪些部分呢?

第一本, 《LTE-UMTS 长期演进理论与实践》: 这一本书需要精读, 也就是要读懂。这本书的优点就不赘述了, 其中最好的部分是第 3 章和第 4 章, 可能需要多读几遍。

第二本, 《3G 演进: HSPA 与 LTE》: 这一本书也需要精读, 但是建议在看完第一本书

后精读。这本书最好的部分是第2部分，可能需要多读几遍。

第三本，《LTE 权威指南》：这本书与《3G 演进：HSPA 与 LTE》的架构有些类似。

第四本，《TD-LTE 技术原理与系统设计》：这本书专讲中国目前最热门的 TD-LTE。

当然，在学习 LTE 前，把 WCDMA 搞清楚是非常必要的，这时可以精读一下《WCDMA 空中接口技术》。

【学 LTE 该买什么版本的参考书？】

这个问题主要来源于早前面推荐的参考书，不少都出了第二版，于是就产生了这样的问题，该买什么版本的书呢？这个问题要逐个看。

第一本，《LTE-UMTS 长期演进理论与实践》：这一本的第二版增加了 LTE-A 的内容，简化了第一版中 LTE-A 的内容。我的建议是，没有买第一版的，买第二版；买过第一版的，找个第二版的英文版做补充。

第二本，《3G 演进：HSPA 与 LTE》：如果是联通的读者，不建议买新版；如果是移动和电信的读者，买新版更有一些。

第三本，《LTE 权威指南》：这本书和《WCDMA 空中接口技术》都不涉及版本问题。

第四本，《TD-LTE 技术原理与系统设计》：如果已经买了第一版，建议不用再买第二版了。

从经济的角度，我建议可以先买《LTE-UMTS 长期演进理论与实践》的第二版、《LTE 权威指南》和《WCDMA 空中接口技术》。

【学习 LTE 应该具备哪些数学知识？】

数学是理解和掌握 LTE 技术的工具。学习 LTE 技术至少应该对以下数学知识比较了解。

① 三角函数：主要是正弦和余弦函数的积化和差以及和差化积、倍角公式。

② 积分：主要是正弦和余弦函数的积分。

③ 复数乘法：知道两个复数乘积的表达式。

④ 矩阵：知道什么是矩阵，知道矩阵可以分解，知道矩阵的秩。

【如何学习 LTE 的物理层？】

物理层是 LTE 的学习难点，如何学习 LTE 的物理层呢？

对于偏重于网络部署的实战人员，一定要搞清楚 OFDM，这是第一位的，牵涉对后续内容帧结构、时频结构的理解，应该说 OFDM 的内容有一定难度，包含 OFDM 的原理与实现两个方面。

接下来需要掌握多天线技术，这也是 LTE 学习的一大难点。学习多天线要以 TM 为中心，围绕 TM 来学习。

之后需要了解 LTE 的帧结构、时频结构，这时需要把 FDD 和 TDD 一并掌握，内容相对比较简单。

之后就是我的特色建议了：以小区参考信号为中心，从发射小区参考信号和接收小区

参考信号两个角度，把小区参考信号弄清楚，比如用的 Gold 码如何产生，在时频结构中的位置，怎样通过同步信号获取小区参考信号的信息，小区参考信号的功率是多大等，最后掌握 RSRP、RSRQ 和 SINR 三个概念。掌握小区参考信号后，学习物理层的目标可以说达成一半了。

接着可以学习控制信道的编码过程、在时频结构中的位置，最后能形成一张时频结构中各种控制信道的分布图，就算大功告成了。

下行学完，上行也就不难了。

【如何高效学习 LTE？】

LTE 的内容很多，学习难度也不小，如何高效学习 LTE 呢？就像“天下武功，唯快不破”一样，高效学习最讲究一个“精”字，高效学习 LTE 也是如此。

LTE 的技术特点是大而全，希望一网打尽，所以有时候我也替搞实现的人担忧，要面临的选项太多了，比如带宽就有 1.4 MHz、3 MHz、5 MHz、10 MHz、15 MHz 和 20 MHz，不但给学习带来很大压力，也给实现带来很大的负担。

实施的人就没有必要向实现的人看齐，我们学习的 LTE 就需要精炼、精炼再精炼，这样才能从众多的技术细节中抓住要害，不至于花了很多时间，还是一头雾水，WCDMA 就是一个现成的例子。

哪些是我们应该把握的重点，哪些又是我们可以暂时忽略的呢？

① 10 MHz 和 20 MHz 是重点，1.4 MHz、3 MHz、5 MHz 和 15 MHz 可以放一边。其中 10 MHz 的 FDD 和 20 MHz 的 TDD 是重点中的重点，因为这是国内目前用得着的。

② 普通 CP 是重点，扩展 CP 可以放一边。如果告诉你 TD-LTE 的站间距为 500 米，你认为扩展 CP 还有必要采用吗？

③ TM2、TM3 是重点，最多加上 TM7、TM8，什么 TM4、TM5、TM6 都可以放一边。

④ OFDM 原理是重点，MIMO 原理次之。

⑤ 2、8 天线是重点，4 天线可以放一边。

⑥ 单层、两层是重点，三层、四层放一边。

【学习 LTE 的参考网站】

(1) 中文

① 读懂通信：<http://www.readhere.cn/bs>。

② 空中接口学园：<http://www.pch.com.cn/bbs>。

③ GPRS 家园：<http://www.gprshome.com/>。

(2) 英文

① www.3gpp.org：下载协议和规范。

- ② www.lteuniversity.com/: 全面的 LTE 学习网站。
- ③ <http://www.sharetechnote.com/>: 与读懂通信类似的学习网站。
- ④ www.scottbaxter.com/: 可以下载 LTE 的培训教材。

(3) 培训课程

- ① 学好 LTE: <http://www.readhere.tk/lte>。
- ② 通信技术: http://edu.51cto.com/lecturer/user_id-4157106.html。

目 录

第 1 章 LTE 技术概述	1
本章导读	2
1.1 LTE 技术	2
1.1.1 什么是 LTE	2
1.1.2 LTE: 名门之后	4
1.1.3 LTE: 架构的革命	5
1.1.4 LTE: 功能的演进	6
1.1.5 LTE 的技术突破	8
1.1.6 LTE: 性能的飞跃	9
1.1.7 LTE: 实测效果	10
1.1.8 LTE: 后浪推前浪	11
1.1.9 LTE: 演进无极限	12
1.1.10 LTE-A 的特点	12
1.1.11 强强对话: LTE 与 WLAN	14
1.2 SAE 核心网	15
1.2.1 CS 域与 PS 域	15
1.2.2 CS 域与 PS 域的设备	16
1.2.3 EPC 的组成	17
1.2.4 MME	18
1.2.5 SGW	19
1.2.6 PGW	20
1.2.7 EPC: 漫游业务的处理	21
1.2.8 EPC: 与其他网络的连接	22
1.3 LTE 无线网络	23
1.3.1 LTE 无线网络的组成	23
1.3.2 LTE 无线网络的功能与层次结构	24
1.3.3 LTE 空中接口的分层结构	25
1.3.4 终端与网络之间的信令承载	27
1.3.5 端到端的业务承载	28
1.3.6 信令承载与业务承载的复用	30

1.3.7	基站信息处理过程	31
1.3.8	基站的种类与结构	31
1.4	LTE 终端	33
1.4.1	LTE 终端的种类	33
1.4.2	LTE 终端的频段	34
1.4.3	中国的 LTE 频段	36
1.4.4	中国的 TD-LTE 频段	37
1.4.5	iPhone 5 的频段分布	40
1.4.6	终端的 LTE 芯片	41
1.5	总结	42
第 2 章	移动通信：从点对点到网络	43
	本章导读	44
2.1	点对点的无线通信	44
2.1.1	无线通信的模型	44
2.1.2	A/D：从信息到数字信号	45
2.1.3	调制：从数字信号到射频信号	49
2.1.4	天线：从射频信号到无线电波	56
2.1.5	载波：无线电波的传播	60
2.1.6	双工：接收与发送	63
2.2	干扰下的移动通信	64
2.2.1	噪声与干扰	64
2.2.2	移动信道特点	67
2.2.3	信道编码：优化传输性能	69
2.2.4	信道的容量	70
2.3	多用户的移动通信	72
2.3.1	多址技术	72
2.3.2	身份识别	74
2.3.3	安全	76
2.4	网络中的移动通信	77
2.4.1	蜂窝技术与频率规划	78
2.4.2	多区技术	80
2.4.3	小区广播	83
2.4.4	寻呼	84

2.4.5 切换	85
2.4.6 分层服务原理	86
2.5 总结	90
第 3 章 OFDM 原理	92
本章导读	93
3.1 OFDM 前传: FDM	93
3.1.1 OFDM 与 FDM	93
3.1.2 从单载波到多载波	94
3.1.3 从多载波到 FDM	97
3.1.4 其实 FDM 也正交	99
3.2 OFDM 为什么正交	101
3.2.1 OFDM 正交的含义	101
3.2.2 能量正交	102
3.2.3 能量如何正交	103
3.2.4 功率正交 vs 能量正交	108
3.3 为何使用 OFDM	109
3.3.1 为什么要用 OFDM	109
3.3.2 OFDM 面临的挑战	112
第 4 章 OFDM 技术的实现	119
本章导读	120
4.1 OFDM 信号的发生方法	120
4.1.1 分立器件发生	120
4.1.2 集成处理发生	122
4.2 OFDM 中的 IFFT	124
4.2.1 DFT: 从合到分	124
4.2.2 IDFT: 从分到合	125
4.2.3 IFFT 的作用	126
4.3 OFDM 信号的发生算法	127
4.3.1 离散余弦变换	127
4.3.2 反向离散哈特利变换 (IDHT)	135
4.3.3 实数 IDFT 变换	137
4.3.4 复数 IDFT 变换	138

4.3.5 各种 OFDM 生成算法对比	141
4.4 基于复数 IFFT 的 OFDM 信号发生	142
4.4.1 输入参数的处理	142
4.4.2 输出结果的处理	143
4.4.3 发生 OFDM 信号的数据流程	144
4.4.4 射频信号的产生	146
4.5 WLAN 与 LTE 中的 OFDM 技术	147
4.5.1 WLAN 中的 OFDM	147
4.5.2 LTE 中的 OFDM	148
4.5.3 深入理解 OFDM 相关术语	151
4.6 总结	152
第 5 章 多天线技术原理	153
本章导读	154
5.1 多天线概述	154
5.1.1 什么是多天线	154
5.1.2 什么是多天线系统	154
5.1.3 多天线系统的缺点	155
5.1.4 多天线系统的应用	156
5.1.5 多天线系统的优点	156
5.1.6 多天线技术的类型	157
5.2 波束赋形: 提升信号强度	158
5.2.1 提升信号强度的方法	158
5.2.2 提升天线增益的原理	159
5.2.3 提升天线增益的方式	160
5.2.4 高增益天线的波束	161
5.2.5 高增益天线的挑战	161
5.2.6 进一步提升天线的增益	162
5.2.7 垂直面的赋形	163
5.2.8 水平面的赋形	164
5.2.9 波束赋形的发展	165
5.2.10 小结	165
5.3 分集: 提升信号稳定性	166
5.3.1 什么是信号稳定性	166

5.3.2	信号为什么不稳定	166
5.3.3	如何提升信号的稳定性	167
5.3.4	分集信号的合并	168
5.3.5	支持分集的多天线	170
5.3.6	接收分集与发射分集	172
5.3.7	接收分集的实施	173
5.3.8	发射分集的实施	173
5.3.9	小结	174
5.4	空间复用: 提高频谱利用率	175
5.4.1	空间复用的效果	175
5.4.2	层: 空间复用的关键	176
5.4.3	层的数量	178
5.4.4	分离各层的数据	180
5.4.5	MIMO 还是 DEMO	181
5.5	总结	181
第 6 章 多天线技术的实现		183
本章导读		184
6.1	WLAN 中的多天线	184
6.1.1	IEEE 802.11a/g	184
6.1.2	IEEE 802.11n	184
6.2	LTE 系统中的多天线	185
6.2.1	多天线的特点	185
6.2.2	FDD LTE 系统中的天线	186
6.2.3	TD-LTE 系统中的天线	186
6.3	LTE 多天线技术中的 TM	187
6.3.1	什么是 TM	188
6.3.2	常用的发射模式 (TM)	189
6.3.3	TM 发射模式的定量分析	190
6.3.4	发射模式 (TM) 的应用场景	192
6.3.5	发射模式 (TM) 的选择	193
6.4	LTE 多天线技术的处理过程	194
6.4.1	数据的处理过程	194
6.4.2	两天线的处理过程	197

6.4.3	八天线的处理过程	200
6.4.4	极化复用 vs 空间复用	201
6.5	总结	202
附录 A	术语表	205
附录 B	缩略语	208
附录 C	常用数学公式	214
参考文献		216

第1章 LTE 技术概述



内容提要

