



国际信息工程先进技术译丛

WILEY

全面详解LTE: MATLAB 建模、仿真与实现

Understanding LTE with MATLAB:
From Mathematical Modeling to Simulation and
Prototyping

[美] Housman Zarrinkoub 著

武冀译

Understanding LTE with MATLAB®

From Mathematical Modeling to Simulation and Prototyping

Housman Zarrinkoub

◎ 第一本LTE与MATLAB完美结合的图书，以实用、高效、直观的方式详解LTE

◎ 详解LTE物理层及相关协议，包含MATLAB源代码，从事LTE领域，你会需要本书

◎ MathWorks公司通信和LTE软件工具负责人权威之作

◎ MATLAB中文论坛鼎力支持
为读者提供全面、超值的配套服务

WILEY



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际信息工程先进技术译丛

全面详解 LTE: MATLAB 建模、仿真与实现

[美] Houman Zarrinkoub 著
武 冀 译



机械工业出版社

本书通过关键核心技术的理论概览、简明扼要地讨论 LTE 标准规范和用于仿真 LTE 标准所需的 MATLAB 算法这三个部分审视了 LTE 标准中的物理层,并通过一系列的程序,展现了每一种 LTE 的核心技术,通过一步步综合这些核心技术,最终建立 LTE 物理层的系统模型并评价系统性能。通过这一循序渐进的过程,读者将会在仿真中深入理解 LTE 的技术构思和标准规范。

本书适合通信、电子工程和计算机专业的学生、研究者和教授阅读,也可供通信系统的工程师、设计师和配置人员参考。

Copyright © 2014 John Wiley & Sons, Ltd.

All Right Reserved. This translation published under license. Authorized translation from English language edition, entitled < Understanding LTE with MATLAB: From mathematical modeling to simulation and prototyping >, ISBN: 978-1-118-44341-5, by Houman Zarrinkoub, 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.

本书中文简体字版由机械工业出版社出版,未经出版者书面允许,本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有,翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记图字:01-2014-5108号

图书在版编目(CIP)数据

全面详解 LTE: MATLAB 建模、仿真与实现/(美)扎林克伯(Zarrinkoub, H.)著;武冀译. —北京:机械工业出版社,2015.3

(国际信息工程先进技术译丛)

书名原文:Understanding LTE with MATLAB: from mathematical modeling to simulation and prototyping

ISBN 978-7-111-48919-1

I. ①全… II. ①扎…②武… III. ①无线电通信-移动网-研究 IV. ①TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 296417 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:林 楨 责任编辑:吕 潇

责任校对:张 薇 封面设计:马精明

责任印制:乔 宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2015 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 28.75 印张 · 529 千字

0 001—3 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-48919-1

定价:88.00 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

服务咨询热线:(010)88361066 机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:(010)68326294 机工官博:weibo.com/cmp1952

(010)88379203 教育服务网:www.cmpedu.com

封面防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

推荐序一

This book, “Understanding LTE with MATLAB” By Dr. Houman Zarrinkoub, is a gem among a large number of books on LTE technology. This is an assessment shared by many readers who, by reading this book, have mastered the theory and concept of LTE technology through hand – on simulation of MATLAB programs. There are 3 unique benefits of the book that make this book truly stand out.

The first unique benefit of this book is the collection of MATLAB examples and test benches that come as essential parts of this book. Through an intuitive and pedagogic approach, the book builds up components of the LTE physical layer (PHY) progressively from simple to more complex using MATLAB programs. These MATLAB programs in the book not only serves as training material on LTE and LTE – Advanced technology, but also empowers readers to obtain a deeper understanding of the subject matter through simulation of MATLAB programs. The MATLAB programs cover simulation, verification and implementation of various components of the LTE system, as well as practical modeling and simulation of the entire LTE system. The up – to – date MATLAB source code can be obtained from the publisher’s web site.

The second unique benefit is that the book explains the complex and hard-to-understand PHY specification of the LTE standards in a simple and easy-to-understand approach. The book strikes a well-thought balance in covering the theoretical background of the enabling technologies, the details regarding the standard specifications, and the algorithms and simulation test benches needed to implement the design. The book focuses on the most common features of the PHY model, and provides an overview treatment of enabling technologies of standard. This helps dissolve the mystery surrounding the LTE PHY specification and makes the book easy to read. Coupled with simulation models of the LTE standard, this book helps readers quickly develop an understanding of the elements that make up a communications system, and obtain a programmatic recipe for the sequence of operations that make up the PHY specifications.

The third unique benefit of this book is that the book focuses specifically on the LTE standard and its evolution and targets a diverse set of readers from different backgrounds: algorithm designers and system engineers working in large and small telecommunications companies, professors and researchers who are working on innovative new

designs for wireless systems, and masters and Ph. D students who want to put together a PHY model of the LTE standard and use those simulations to test their innovative new ideas and designs. Unlike many titles that treat only the mathematical foundation of the standard, this book discusses the mathematical formulation of many enabling technologies (such as OFDM and MIMO) in the context of the overall performance of the system. Furthermore, by including chapters dedicated to simulation, performance evaluation, and implementation, the book broadens its appeal to a much larger readership composed of both academicians and practitioners.

In a recent conversation with me, Dr. Zarrinkoub expressed his appreciation for the enthusiastic correspondences with the readers. He is looking forward to more discussions with his readers after the release of the Chinese edition, and is always ready to make improvement to the book and MATLAB programs, hoping the book will provide a positive influence in every reader's professional lives.

John Zhao

Worldwide product marketing manager, MathWorks

推荐序一（译文）

Houman Zarrinkoub 博士撰写的这本书，《全面详解 LTE：MATLAB 建模、仿真与实现》，是大量关于 LTE 技术方面的书籍中的一块瑰宝，这是众多受益读者的共同评价。很多读者已经通过运行书中提供的 MATLAB 程序迅速地掌握了 LTE 通信技术的理论和概念。本书之所以能够脱颖而出是因为本书具有三个优势。

第一个优势是，书中贯穿着大量的 MATLAB 实例和测试平台的源代码。本书结合直观理解和理论教学的方法，用 MATLAB 程序帮读者由浅入深地逐步建立起 LTE 物理层（PHY）的每个组件。这些 MATLAB 程序不仅可以作为 LTE 和 LTE-A 的实用培训教材，而且还可以通过仿真 MATLAB 程序帮读者加深对 LTE 理论层面的理解。书中提供的 MATLAB 程序包括仿真，验证和实现 LTE 系统的各种组件，也包括整个 LTE 系统的实际建模和仿真。最新 MATLAB 源代码可以从出版商的网站上获得。

第二个优势是，本书用浅显易懂的办法来讲解复杂深奥的 LTE 物理层的规范。本书既涵盖了相关的无线通信的理论背景，也深入探讨了 LTE 标准规范的细节，同时也提供了具体的算法和仿真测试平台。本书的重点集中在物理层的最常见的功能上，同时也对涉及的无线通信的基础理论进行了概括。这样有助于揭开 LTE 物理层规范的神秘面纱，使本书易于阅读。结合书中提供的 LTE 的仿真模型，本书可以帮助读者迅速理解 LTE 通信系统中的每一个组件，并很快对 LTE 物理层具体操作形成全面的认识。

第三个优势是，本书的主要内容集中在介绍 LTE 标准的内容和它的演变过程上。本书面向来自不同领域，具有不同技术背景的读者：大型或小型的电信公司的算法设计人员、系统工程师、无线系统研究领域的教授和研究人员，以及硕士和博士研究生。他们可以建立起 LTE 标准的物理层的模型，通过数字模拟来测试和验证其理论和设计上的创新。不像其他只注重通信标准的数学基础的书，本书着手于 LTE 的关键技术（如 OFDM 和 MIMO）的数学公式和演变，以及这些关键技术对系统的整体性能的影响。此外，由于书中包含了这些系统模拟和系统性能评估的专门章节，本书对学术界和企业界的读者都同样适用。

在我们最近的一次谈话中，Zarrinkoub 博士对为本书提出宝贵意见的热心读者们表示衷心感谢。他期待在本书中文版发行后，他会与更多的中文读者进行交

流和讨论，并随时听取读者的建议，对书中的内容和 MATLAB 程序进行改进。他希望这本书能对每一位读者的职业生涯产生积极的影响。

赵志宏 (John Zhao)

MathWorks 美国总部产品市场经理

推荐序二

LTE 和 LTE - Advance 是由 3GPP 开发的新一代移动通信标准。伴随着我国、北美、欧洲、日本覆盖 LTE 网络之后，世界电信业正式拉开了 4G 网络运营的帷幕。

本书中，作者用 MATLAB 这个科学运算语言与仿真环境，清晰地解释了 LTE 技术的数学思想与架构，详细解读了 LTE 移动通信标准，并聚焦其物理层，构建算法、测试平台等，通过仿真加深读者对技术的理解。这样有利于读者了解 LTE 是如何以及为什么能完成如此标志性的技术成果。

本书还循序渐进深入浅出地介绍了 MATLAB 中通信系统工具箱、数字处理工具箱和系统工具箱 3 个部分的上百种组件，讲解和实现了与 LTE 出色性能相关的关键技术及其数学基础，如正交频分复用（OFDM）、多输入多输出（MIMO）、Turbo 编码和动态链路自适应等技术。真正将 MATLAB 变为易于驾驭的工具，将使用者从研究工具的使用方法中解放出来，将重点放到设计本身，从而将极大地提高设计效率，极大方便了 MATLAB 用户的使用。

本书不但可以帮助对移动通信技术感兴趣的工程师、研究者群体从另一个角度更加深入地理解 LTE 技术标准和关键技术。同时，本书还提供了一个能够更加深入理解 MATLAB 的机会，帮助读者充分发挥 MATLAB 的潜能。读者可以利用 MATLAB 验证、改进和创新，推进未来移动通信系统的研究和进步。

李楠

中国移动通信集团设计院有限公司

译者序

LTE 是当前最前沿的移动通信标准，以其为模板的 4G 网络已经成为世界无线移动通信网络的最新发展方向。我国在北美、欧洲、日本覆盖 4G 网络之后紧跟技术发展步伐，以东部超大城市圈为试点，逐步将 4G 推广到全国各大中城市。LTE 以及 LTE-Advanced 技术凭借其向下兼容性的特点，将为设备层和应用层更新提供极大帮助。基于 4G 技术的各种应用如雨后春笋般出现并蓬勃发展，极大地丰富和满足了社会各群体的日常生活和各种需要。

本书就在这样一个背景下应运而生。本书基于 MATLAB 这样一个广泛应用于科学计算和建模领域的语言和开发环境，对 LTE 标准的建模和实现进行深入讨论。本着从实际问题中来，到服务实际应用中去的原则，以最贴近真实移动通信环境的建模为途径，分块剖析了 LTE 标准的各关键技术和实现方法，为广大通信领域的师生、关注学术前沿的学者、开发团体和现场工程师提供了方法和工具引导。

本书用最基础和易懂的理论知识概括了现代移动通信技术中的重要概念，如 OFDM、MIMO 以及链路自适应等。同时，本书意留下或指出了可扩展和创新的突破口，可推动 LTE 和移动通信技术的不断进步，为广大有志于推进移动通信技术创新的科学技术工作者们点燃明灯，影响深远。

MATLAB 在科学计算领域以其普适性和精确性为业界所称道。从其问世至今，其始终独占科学计算语言和开发环境的鳌头。但同时，其几乎无所不包的功能组件也带来了使用上的不便。仅移动通信领域应用，就涉及通信系统工具箱、数字处理工具箱和系统工具箱三个部分上百种组件。如何正确使用相应组件构建如 LTE 这样的现代移动通信系统，是不少 MATLAB 初学者棘手的问题。本书针对这个问题循序渐进、有的放矢，以若干个关键工具箱组件为基础，以点带面，较为详细地讲解了这些工具箱组件的使用和配置条件以及方法。极大方便了 MATLAB 用户的使用。真正将 MATLAB 变为易于驾驭的工具，将使用者从研究工具使用中解放出来，将重点放到设计本身，从而将极大地提高设计效率。

愿这本书如作者所希望的，真正服务学生、老师、研究者和系统设计工程师群体，特别是国内移动通信领域，点燃无线通信技术未来发展创新之火。为更多惊艳和实用技术的出现尽微薄之力！

原 书 前 言

LTE (Long Term Evolution, 长期演进) 技术和 LTE - Advanced (高级 LTE) 是由 3GPP (Third Generation Partnership Project, 第三代合作伙伴计划) 开发的最新移动通信标准。这两个标准的推出标志着移动通信技术进步中革命性的变革。近十年来, 网络架构与移动终端被设计和升级以支持 LTE 标准。伴随着这些系统扩展到全球各个角落, LTE 标准真正实现了全球基带移动接入技术的梦想。

本书将会详细解读 LTE 移动通信标准, 特别是针对它的物理层, 以求理解 LTE 是如何以及为什么能完成如此标志性的技术成果。我们也同时会从学术与实用的角度去审视它。我们将会讲解与实现 LTE 的出色性能相关的关键技术及其数学基础, 比如正交频分复用 (OFDM) 和多输入多输出 (MIMO)。我们也会说明实现这些架构与组件的实用工程学思想。作为本书的组成部分, 我们使用 MATLAB 这个在科学与工程领域广泛应用的科学运算语言与仿真环境, 来清晰地解释 LTE 技术的数学思想与架构, 并构建算法、测试平台和图例, 希望通过仿真让读者深入理解该技术。

本书针对学术领域与专业工程技术人员编写, 明确聚焦 LTE 标准和它的发展过程。区别于很多书籍只讲解某一个技术标准的数学基础, 本书将在文中讲解 LTE 所涉及的很多技术 (比如 OFDM 和 MIMO)。而且, 很多章节专注于仿真、性能评估和应用, 使本书广泛适用于除学术研究与工程技术人员之外更广阔领域的读者。

本书将用一种直观和便于讲解的方法, 使用 MATLAB 从简单到复杂, 一点点构建 LTE 物理层的组件。通过 MATLAB 程序仿真, 读者将会自信地感到不仅可以完全理解技术标准必要的细节, 也可以学会应用它们的能力。

本书力求清晰地阐述 LTE 物理层模型相关的技术细节, 所以通信理论和数字信号处理的基础知识是必备的。电子工程系本科高年级的课程基本涵盖了这些知识。为了通过 MATLAB 仿真展开教学, MATLAB 语言基础也是需要提前掌握的内容。本书既面向电子工程和计算机专业的学生、研究者和教授, 也面向通信系统的工程师、设计师和配置人员。这些从技术与编程两方面阐述的知识在日常工作中具有较强应用性。根据读者的领域不同, 本书内容大致分为导论、中级和高级三个层次。

本书在构思上可分为两个部分。第一部分结合 MATLAB 算法对 LTE 的物理层进行建模, 使读者可以仿真和验证系统的各个组件。第二部分结合实际深入详

解诸如系统仿真与配置以及各组件的原型构建等问题。第 1 章, 对 LTE 标准进行了概括性的介绍, 包括其起源、目标以及四种作为基本组件的关键技术 (OFDM、MIMO、Turbo 编码和动态链路自适应原理); 第 2 章快速而充分地概述了 LTE 物理层的规格; 第 3 章介绍了本书所使用 MATLAB 和 Simulink 的建模、仿真以及实现的有关功能; 第 4~7 章深入详解了 LTE 标准的每一个关键技术 (调制和编码、OFDM、MIMO 和链路自适应) 并建立 MATLAB 模型, 互相参照逐步构建基于这些技术的 LTE 物理层的组件; 第 8 章总结并深刻分析前文中讲解的关键技术, 并展示了 MATLAB 如何对 LTE 的物理层建模, 从而对第一部分做了归纳。第 9 章讨论了如何应用多种方案提高 MATLAB 的运行速度, 这些方案包括并行计算、C 代码自动生成、GPU 运算、更高效的算法等; 第 10 章讨论了一些实现方面的问题, 比如目标环境以及它们如何影响编程风格等, 作为硬件配置的前提, 也讨论了数据的定点数表记法及其对性能的影响; 第 11 章总结了前文所有的讨论并做一些前瞻性的研究方向预测。

所有对复杂通信系统如 LTE 技术的背景介绍, 都需要设定一定的讲解范围。我们明确了三个概念上的要素, 这样可以帮助读者深刻理解 LTE 标准如何工作:

- 关键技术的理论背景;
- 标准规范详细内容;
- 实现设计的算法与仿真验证手段。

为了更有效地扩展本书的内容, 本书决定打破对每一个方面都采用平均深度讲解的套路, 而是选择对理论基础和标准的技术规范进行充分讨论, 并对实现 LTE 标准的多种模式的算法与验证手段进行更全面详细的讲解, 覆盖开发 MATLAB 应用所需的专业技术。下面两个因素促使本书进行这样的选择:

● 很多书籍对上面第一和第二个方面进行了非常全面的讲解, 但并没有关注算法与仿真, 强调仿真是本书的新意;

● 通过提供 LTE 标准的仿真模型, 我们希望读者扩展理解这些组成通信系统的模型组件和它们内含的编程技巧, 从而整合成整个 LTE 物理层模型的一系列操作。算法与验证手段也会通过仿真过程自然地揭示系统的动态特性。

从这个意义上讲, 对仿真细节的深入洞悉和理解是非常宝贵的, 这会使读者精通自己研究的问题。更珍贵的是, 它们使读者有自信去尝试新想法、新提议和验证新的改进, 以及利用新工具和模型帮助大学生从理论知识迈向实践, 从而最终获得创新、设计、应用的能力。

希望本书可以为对移动通信感兴趣的年轻研究者、学生、教授群体提供一个有现实意义的建模和仿真 LTE 标准的框架。也希望读者能分享本书的所学所得, 提出改进和创新意见, 推动未来移动通信系统的研究和发展。

专业词汇缩略语表

ASIC	Application-Specific Integrated Circuit	专用集成电路
BCH	Broadcast Channel	广播信道
BER	Bit Error Rate	误码率
BPSK	Binary Phase Shift Keying	二进制移相键控
CP	Cyclic Prefix	循环前缀
CQI	Channel Quality Indicator	信道质量指示符
CRC	Cyclic Redundancy Check	循环冗余检查
CSI	Channel State Information	信道状态信息
CSI - RS	Channel State Information Reference Signal	信道状态信息参考信号
CSR	Cell-Specific Reference	小区专有参考
CUDA	Compute Unified Device Architecture	统一计算设备架构
DM - RS	Demodulation Reference Signal	解调参考信号
DSP	Digital Signal Processor	数字信号处理器
eNodeB	enhanced Node Base station	增强型基站
E - UTRA	Evolved Universal Terrestrial Radio Access	演进通用陆地无线接入
FDD	Frequency Division Duplex	频分双工
FPGA	Field-Programmable Gate Array	现场可编程门阵列
HARO	Hybrid Automatic Repeat Request	混合自动重传请求
HDL	Hardware Description Language	硬件描述语言
IMT	International Mobile Telecommunication	国际移动通信
LTE	Long Term Evolution	长期演进
MAC	Medium Access Control	媒介访问控制
MBMS	Multimedia Broadcast and Multicast Service	多媒体广播组播业务
MBSFN	Multicast/Broadcast over Single Frequency Network	组播/广播单频网络
MIMO	Multiple Input Multiple Output	多输入多输出
MMSE	Minimum Mean Square Error	最小均方误差
MRC	Maximum Ratio Combining	最大比合并

MU – MIMO	Multi-User Multiple Input Multiple Output	多用户多输入多输出
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	正交频分复用
PBCH	Physical Broadcast Channel	物理广播信道
PCFICH	Physical Control Format Indicator Channel	物理控制格式指示信道
PCM	Pulse Code Modulation	脉冲编码调制
PDCCH	Physical Downlink Control Channel	物理下行链路控制信道
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel	物理下行链路共享信道
PHICH	Physical Hybrid ARQ Indicator Channel	物理 HARQ 指示信道
PHY	Physical Layer	物理层
PMCH	Physical Multicast Channel	物理组播信道
PRACH	Physical Random Access Channel	物理随机接入信道
PSS	Primary Synchronization Signal	主同步信号
PUCCH	Physical Uplink Control Channel	物理上行链路控制信道
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel	物理上行链路公共信道
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	正交振幅调制
QPP	Quadratic Permutation Polynomial	二次置换多项式
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	正交移相键控
RLC	Radio Link Control	无线链路控制协议
RMS	Root Mean Square	方均根
RRC	Radio Resource Control	无线资源控制协议
RTL	Register Transfer Level	寄存器传输级
SC – FDM	Single-Carrier Frequency Division Multiplexing	单载波频分复用
SD	Sphere Decoder	球形译码器
SFBC	Space-Frequency Block Coding	空频分组编码
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio	信号与干扰加噪声比
SNR	Signal-to-Noise Ratio	信噪比
SSD	Soft-Sphere Decoder	软球形译码器

SSS	Secondary Synchronization Signal	辅助同步信号
STBC	Space-Time Block Coding	空时分组编码
SFBC	Space-Frequency Block Coding	空频分组编码
SU – MIMO	Single-User MIMO	单用户 MIMO
TDD	Time-Division Duplex	时分双工
UE	User Equipment	用户设备
ZF	Zero Forcing	迫零算法

目 录

推荐序一

推荐序一 (译文)

推荐序二

译者序

原书前言

专业词汇缩略语表

1 导论	1
1.1 无线通信标准速览	1
1.2 数据速率的历史	4
1.3 IMT - Advanced 要求	4
1.4 3GPP 和 LTE 标准化	5
1.5 LTE 要求	5
1.6 理论策略	6
1.7 LTE 关键技术	7
1.7.1 OFDM	7
1.7.2 SC - FDM	8
1.7.3 MIMO	8
1.7.4 Turbo 信道编码	8
1.7.5 链路自适应	9
1.8 LTE 物理层建模	9
1.9 LTE (R8 版和 R9 版)	10
1.10 LTE - Advanced (R10 版)	11
1.11 MATLAB 和无线系统设计	11
1.12 本书组织结构	11
参考文献	12
2 LTE 物理层概览	13
2.1 空中接口	13
2.2 频带	14
2.3 单播和组播服务	15
2.4 带宽分配	16
2.5 时间帧	17
2.6 时 - 频分布	18

2.7 OFDM 多载波传输	20
2.7.1 循环前缀	20
2.7.2 子载波间隔	21
2.7.3 资源块尺寸	21
2.7.4 频域调度	22
2.7.5 接收端典型操作	22
2.8 单载波频分复用	23
2.9 资源网格的内容	23
2.10 物理信道	24
2.10.1 下行链路物理信道	25
2.10.2 下行链路信道功能	26
2.10.3 上行链路物理信道	29
2.10.4 上行链路信道功能	30
2.11 物理信号	30
2.11.1 参考信号	30
2.11.2 同步信号	32
2.12 下行链路帧结构	32
2.13 上行链路帧结构	33
2.14 MIMO	34
2.14.1 接收分集	34
2.14.2 发射分集	34
2.14.3 空分复用	36
2.14.4 波束赋形	37
2.14.5 循环延迟分集	38
2.15 MIMO 模式	38
2.16 物理层数据处理	39
2.17 下行链路数据处理	39
2.18 上行链路数据处理	40
2.18.1 SC - FDM	41
2.18.2 MU - MIMO	42
2.19 本章小结	43
参考文献	43
3 MATLAB 通信系统设计	44

3.1 系统开发流程	44	4.4 Turbo 编码	79
3.2 挑战和能力	44	4.4.1 Turbo 编码器	80
3.3 关注点	45	4.4.2 Turbo 译码器	81
3.4 目标	45	4.4.3 MATLAB 实例	81
3.5 MATLAB 的物理层模型	46	4.4.4 BER 测量	83
3.6 MATLAB	46	4.5 早期终止机制	87
3.7 MATLAB 工具箱	47	4.5.1 MATLAB 实例	87
3.8 Simulink 组件	47	4.5.2 BER 测量	88
3.9 建模与仿真	48	4.5.3 计时测量	91
3.9.1 DSP 系统工具箱	48	4.6 码率匹配	91
3.9.2 通信系统工具箱	48	4.6.1 MATLAB 实例	92
3.9.3 并行计算工具箱	49	4.6.2 BER 测量	95
3.9.4 定点型设计器	49	4.7 码块分段	97
3.10 原型建模与实现	49	4.7.1 MATLAB 实例	97
3.10.1 MATLAB 代码生成器	50	4.8 LTE 传输信道处理	99
3.10.2 硬件实现	50	4.8.1 MATLAB 实例	99
3.11 系统对象介绍	51	4.8.2 BER 测量	101
3.11.1 通信系统工具箱的 系统对象	51	4.9 本章小结	103
3.11.2 系统对象的测试平台	52	参考文献	103
3.11.3 系统对象函数	54	5 OFDM	104
3.11.4 字符误码率仿真	56	5.1 信道建模	104
3.12 MATLAB 信道编码实例	57	5.1.1 大尺度和小尺度衰落	104
3.12.1 纠错与检错	57	5.1.2 多径衰落效应	105
3.12.2 卷积码	58	5.1.3 多普勒效应	105
3.12.3 硬判决 Viterbi 译码	58	5.1.4 MATLAB 实例	105
3.12.4 软判决 Viterbi 译码	60	5.2 讨论范围	110
3.12.5 Turbo 编码	62	5.3 工作流程	110
3.13 本章小结	64	5.4 OFDM 和多径衰落	110
参考文献	65	5.5 OFDM 和信道响应估计	111
4 调制和编码	66	5.6 频域均衡	112
4.1 LTE 调制方案	66	5.7 LTE 资源网格	112
4.1.1 MATLAB 实例	68	5.8 配置资源网格	114
4.1.2 BER 测量	72	5.8.1 CSR 符号	114
4.2 比特级绕码	74	5.8.2 DCI 符号	115
4.2.1 MATLAB 实例	75	5.8.3 BCH 符号	115
4.2.2 BER 测量	78	5.8.4 同步符号	116
4.3 信道编码	79	5.8.5 用户数据符号	116
		5.9 参考信号生成	118

5.10 资源元素映射	120	6.7.2 收发器启动函数	188
5.11 OFDM 信号生成	124	6.7.3 下行链路传输模式 2	197
5.12 信道建模	125	6.7.4 空分复用	204
5.13 OFDM 接收端	127	6.7.5 空分复用中的 MIMO 操作	207
5.14 资源元素反映射	129	6.7.6 下行链路传输模式 4	215
5.15 信道估计	131	6.7.7 开环空分复用	229
5.16 均衡器增益计算	133	6.7.8 下行链路传输模式 3	233
5.17 信道可视化	134	6.8 本章小结	240
5.18 下行链路传输模式 1	135	参考文献	241
5.18.1 SISO 模型	135	第 7 章 链路自适应	242
5.18.2 SIMO 模型	142	7.1 系统模型	243
5.19 本章小结	150	7.2 LTE 中的链路自适应	244
参考文献	151	7.2.1 信道质量估计	244
6 MIMO	152	7.2.2 预编码矩阵估计	245
6.1 MIMO 定义	152	7.2.3 秩估计	245
6.2 MIMO 的动机	153	7.3 MATLAB 实例	245
6.3 MIMO 的种类	153	7.3.1 CQI 估计	245
6.3.1 接收端合并技术	153	7.3.2 PMI 估计	248
6.3.2 发射分集	154	7.3.3 RI 估计	249
6.3.3 空分复用	154	7.4 子帧间的链路自适应	252
6.4 MIMO 的覆盖范围	154	7.4.1 收发端模型结构	253
6.5 MIMO 信道	154	7.4.2 更新收发端参数 结构体	254
6.5.1 MATLAB 实现	155	7.5 自适应调制	255
6.5.2 LTE 特征信道模型	157	7.5.1 无自适应	255
6.5.3 MATLAB 实现	159	7.5.2 随机变更调制方案	256
6.5.4 MIMO 信道初始化	160	7.5.3 基于 CQI 的自适应	256
6.5.5 添加 AWGN	161	7.5.4 收发端性能验证	257
6.6 MIMO 的一般特征	161	7.5.5 结论	259
6.6.1 MIMO 资源网格结构	162	7.6 自适应调制与编码率	260
6.6.2 资源元素映射	163	7.6.1 无自适应	260
6.6.3 资源元素反映射	166	7.6.2 随机变更调制方案	261
6.6.4 基于 CSR 的信道估计	170	7.6.3 基于 CQI 的自适应	261
6.6.5 信道估计函数	171	7.6.4 收发端性能验证	262
6.6.6 信道估计扩展	173	7.6.5 结论	262
6.6.7 理想信道估计	177	7.7 自适应预编码	264
6.6.8 信道响应提取	179	7.7.1 基于 PMI 的自适应	266
6.7 MIMO 的特殊特征	180		
6.7.1 发射分集	180		