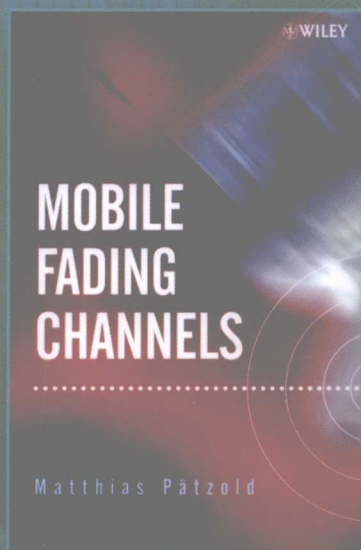


国外电子与通信教材系列

移动衰落信道

Mobile Fading Channels



[德] Matthias Pätzold 著

陈伟译



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

国外电子通信教材系列

移动衰落信道

Mobile Fading Channels

[德] Matthias Pätzold 著

陈伟译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书的目的是向读者介绍移动衰落信道建模、分析和仿真的基本原理。全书共分8章,内容包括移动无线信道的基本理论,随机变量、随机过程和确定性信号的基本知识,作为参考模型的瑞利过程和莱斯过程的基本性质,确定性信道建模原理以及确定性过程的基本性质和统计特性,确定性过程模型参数的计算方法,频率非选择性与频率选择性随机信道模型及其确定性信道模型,快速信道仿真器等。

本书层次结构清晰,内容全面,叙述由浅入深,文献资料详实,充分反映了国际上近年来移动信道建模的理论方法和最新研究成果,可以帮助读者尽快了解和跟踪移动衰落信道研究的最新发展。

本书可作为在无线通信领域的企业和研究机构工作的工程师、计算机科学家和物理学家们的工具书,也可作为高等院校电子与通信工程及相关专业高年级本科生与研究生的教科书,还可供对目前一般随机信道和确定性信道建模问题进行研究的科学工作者参考。

The Chinese Translation Edition copyright ©2008 by Publishing House of Electronics Industry under license by author Matthias Pätzold.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission in writing from the Proprietor.

本书简体中文版由电子工业出版社出版。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2008-4403

图书在版编目(CIP)数据

移动衰落信道 / (德)佩措尔德(Pätzold, M.)著; 陈伟译. —北京: 电子工业出版社, 2009.1
(国外电子通信教材系列)

书名原文: Mobile Fading Channels

ISBN 978-7-121-07412-7

I. 移… II. ①佩…②陈… III. 移动通信—通信技术 IV. TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 145894 号

责任编辑: 段丹辉

印 刷: 北京市天竺颖华印刷厂

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

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: 24.25 字数: 528 千字

印 次: 2009 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 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。

序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老教师和专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授
“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学工作中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择和自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为做好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、南京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过与作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

教材出版委员会

- | | | |
|-----|------------------------------|--|
| 主任 | 吴佑寿 | 中国工程院院士、清华大学教授 |
| 副主任 | 林金桐 | 北京邮电大学校长、教授、博士生导师 |
| | 杨千里 | 总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长
中国通信学会常务理事、博士生导师 |
| 委员 | 林孝康 | 清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
清华大学深圳研究生院副院长 |
| | 徐安士 | 北京大学教授、博士生导师、电子学系主任 |
| | 樊昌信 | 西安电子科技大学教授、博士生导师
中国通信学会理事、IEEE 会士 |
| | 程时昕 | 东南大学教授、博士生导师 |
| | 郁道银 | 天津大学副校长、教授、博士生导师
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员 |
| | 阮秋琦 | 北京交通大学教授、博士生导师
计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长
国务院学位委员会学科评议组成员 |
| | 张晓林 | 北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长
教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会副主任委员
中国电子学会常务理事 |
| | 郑宝玉 | 南京邮电大学副校长、教授、博士生导师
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员 |
| | 朱世华 | 西安交通大学副校长、教授、博士生导师
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员 |
| | 彭启琮 | 电子科技大学教授、博士生导师 |
| | 毛军发 | 上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长
教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员 |
| | 赵尔沅 | 北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报（英文版）》编委会主任 |
| | 钟允若 | 原邮电科学研究院副院长、总工程师 |
| | 刘彩 | 中国通信学会副理事长兼秘书长，教授级高级工程师
信息产业部通信科技委副主任 |
| | 杜振民 | 电子工业出版社原副社长 |
| | 王志功 | 东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长
教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员 |
| 张中兆 | 哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院院长 | |
| 范平志 | 西南交通大学教授、博士生导师、信息科学与技术学院院长 | |

原作者为本书所做的序

我的英文版书《移动衰落信道》翻译成中文出版的想法可以追溯到 2006 年年中。那年夏天，陈伟教授作为访问学者来到挪威阿格德尔大学 (University of Agder)，我很高兴与他合作探讨信道建模问题。从他提及希望把我的这本书翻译成中文介绍到中国大陆的第一刻起，我就毫不犹豫地赞同他的提议。从与我的一些来自中国的同事和学生的讨论中得知，中文版的专门研究移动衰落信道内容的书会有很好的出版市场。同时，我也很高兴地看到本书中文版的出版会对中国移动通信领域起到参考作用。希望本书所阐述的有关移动衰落信道的内容和方法会促进这个领域更深入的研究。

由于不深谙中文，我对出版中文版书所做的工作很有限。因此，我要对许多为中文版书出版所做大量专业性工作的人们表示感谢。首先要特别感谢主要译者陈伟教授，其为本书作专业翻译以及协调出版工作所涉及的各方面，包括与北京电子工业出版社编辑部、合作译者、审阅人、试读者，以及书作者。我也非常感谢帮助完成本书出版工作的以上所提到的各方面人员。

我还要感谢为本书中文版的翻译提出许多有益建议的各位审读人员。衷心感谢阿格德尔大学的博士生马媛媛和伍一博士，他们协助完成了对全书中文手稿的校对并形成了本书的最后版本。

最后，我要特别感谢电子工业出版社的编辑段丹辉先生和刘皎 (Joyce) 小姐，他们的帮助、指导和支持贯穿于本书出版的整个过程。

Matthias Pätzold

阿格德尔大学移动通信组

2008 年 11 月

译者序

移动通信无疑是当前发展最快、应用最广和技术最前沿的通信领域之一。特别是随着现代移动通信从第一代(1G)、第二代(2G)发展到第三代(3G)和后三代(B3G),以及学术界和产业界已提出的研究开发第四代(4G)的技术与标准和第五代(5G)移动通信系统的构想,极大地推动了移动通信技术的革命性发展步伐。同时,移动通信的市场也以前所未有的速度朝前推进,所提供的业务随着更高带宽的传输和更大系统容量的实现,包括能支持语音、数据、图像、视频等多媒体业务,预期在21世纪将会有更大、更重要的进展。

现代移动通信的发展涉及通信信号与信道、分集接收机与最佳接收机、信源编码与信道编码、数字调制与解调等多方面技术,而无线信道及信道建模构成了移动通信传输技术的理论基础。广义上讲,移动无线信道属于随参信道,该信道的特性比恒参信道的要复杂得多,对信号的影响也要严重得多。同时,移动无线信道也属于衰落信道,由于电波传播的多样性无法用精确的数学模型来描述其信道模型,只能通过用数学上随机过程和统计模型的方法建立无线电信号的传播环境来分析和仿真实际物理信道,因此,移动衰落信道的建模、分析与仿真将为移动通信传输系统的设计与应用奠定基础。

本书译者于2006年6月至9月在挪威阿格德尔大学(University of Agder)移动通信组(Mobile Communications Group)做访问学者学习期间,与原书作者Matthias Pätzold教授讨论希望把*Mobile Fading Channels*一书介绍到国内,并翻译成中文以便更多从事移动通信技术领域的工作者和学习者借鉴与参考,Pätzold教授欣然应诺,并答应会尽力协助原书中文版的出版工作。由于目前国内尚无专门就衰落信道建模与仿真的专著或教材出版,因此本书对希望全面深入了解移动衰落信道建模、分析与仿真的理论基础和应用实践的读者有很好的参考价值。

在本书翻译过程中得到了华中科技大学电子与信息工程系姚天任教授的热情鼓励和支持。贺智轶、张丽丽、陈思思、鲁巧丽、王茜、孙磊君、王雪丽、罗娜等博士生和硕士生参与了初稿前期的翻译与文字整理工作。原书作者Matthias Pätzold教授也通过电子邮件对本书的翻译提出了有益的建议。电子工业出版社的段丹辉编辑以饱满的热情和细致的工作使本书的翻译工作不断完善。在此,均表示衷心的感谢!尽管如此,由于时间的限制和对原书理解的不够深入,本书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

译者

2008年8月1日于武汉

序 言

本书来源于我在德国 TUHH (Technical University of Hamburg-Harburg) 的教学和研究工作。书中基本内容是基于我的德文版 *Mobilfunkkanäle—Modellierung, Analyse und Simulation* 一书, 该书于 1999 年由德国 Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden 出版。德文版书曾作为我于 1996 年至 2000 年在 TUHH 给电子工程专业硕士研究生讲授“现代网络建模方法”课程的教材。

本书主要针对在无线通信领域的企业或研究机构工作的工程师、计算机科学家和物理学家们, 他们对涉及到移动衰落信道的学科有专业兴趣。此外, 本书也适用于对目前随机和确定性信道建模问题进行研究的科学工作者。最后, 本书还可作为电子工程专业专门从事移动无线通信学习的硕士研究生的教科书。

为了更好地学习本书, 需要有在硕士研究生阶段的学生通常熟悉的概率论和系统论的基本知识。为了更好地理解本书内容, 在本书内容的开始部分给出书中所要用到的基本数学工具的要点概述。以此为起点, 本书中几乎所有的陈述都会得到详细的推导, 以便得到在数学上的高度一致性。由于有足够的建议和帮助, 可以确保有兴趣的读者能经过一定的努力来验证其结果。书中更多的数学推导流程可以在附录中找到。同时, 读者还可以找到书中精选的 MATLAB 程序, 该程序可以对本书中阐述的方法给出实际的应用帮助。为了举例说明结果, 书中包含了大量图示, 其含义在文中给出了解释。根据我个人的经验, 为了在一定程度上简化内容的可读性, 书中尽量避免使用缩略语。此外, 书中提供了大量的参考文献, 以便让读者能在无边无际的移动衰落信道建模主题中找到进一步的参考资料。

本书的目的是向读者介绍移动衰落信道建模、分析和仿真的基本原理。书中讨论的主要核心之一是对确定性过程的处理, 其形成了有效信道仿真器发展的基础。为了设计确定性过程以及所给出的相关性能, 书中对到目前为止的几乎所有文献都进行了介绍和分析, 并评估了其性能。在此基础上更进一步的重点是引出并分析随机信道模型, 以及对各类型频率选择性和频率非选择性移动无线信道开发更精确的信道仿真器。此外, 一个主要专题是要使所设计的信道模型的统计特性适应实际模型的统计属性。

谨此, 我要感谢许多人, 没有他们的帮助本书不可能以现在这个版本出版。我要最衷心地感谢 Stephan Kraus 和 Can karadogan, 感谢其帮助我对英文稿进行的细致翻译。我要特别感谢 Frank Laue, 感谢其帮助我完成了本书的计算机实验和插图绘制工作, 这些工

作显著地改进了内容的清晰度和简化了对本书的理解。真诚地感谢 Alberto Diaz Guerrero 和 Qi Yao，他们的工作包括检查了大部分原稿并给我提出了许多建议，这些建议帮助我对原稿进行了修改并成为现在的正式版本。最后，我要感谢 Hammond 和 Sarah Hinton，他们是我在 John Wiley & Sons 公司的编辑。

Matthias Pätzold
2002 年 1 月于 Grimstad

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	移动无线系统的沿革	1
1.2	移动无线信道的基本理论	3
1.3	本书的结构	6
第 2 章	随机变量、随机过程和确定性信号	8
2.1	随机变量	8
2.1.1	重要的概率密度函数	11
2.1.2	随机变量的函数	15
2.2	随机过程	16
2.2.1	平稳过程	18
2.2.2	遍历过程	20
2.2.3	电平通过率和平均衰落持续时间	20
2.3	确定性连续时间信号	22
2.4	确定性离散时间信号	24
第 3 章	作为参考模型的瑞利过程和莱斯过程	27
3.1	莱斯过程和瑞利过程的一般描述	28
3.2	莱斯过程和瑞利过程的基本性质	29
3.3	莱斯过程和瑞利过程的统计特性	32
3.3.1	振幅和相位的概率密度函数	32
3.3.2	电平通过率和平均衰落持续时间	34
3.3.3	瑞利过程衰落时间间隔的统计特性	39
第 4 章	确定性过程的理论导论	45
4.1	确定性信道建模的原理	45
4.2	确定性过程的基本性质	49
4.3	确定性过程的统计特性	52
4.3.1	振幅和相位的概率密度函数	52

4.3.2	电平通过率和平均衰落持续时间	60
4.3.3	低电平衰落时间间隔的统计特性	64
4.3.4	性能估计的各态历经和标准	66
第 5 章	确定性过程模型参数的计算方法	69
5.1	离散多普勒频率和多普勒系数的计算方法	70
5.1.1	等距法 (MED)	70
5.1.2	均方误差法 (MSEM)	76
5.1.3	等面积法 (MEA)	80
5.1.4	蒙特卡罗法 (MCM)	88
5.1.5	L_p -norm 法 (LPNM)	97
5.1.6	精确多普勒扩展法 (MEDS)	108
5.1.7	Jakes 法 (JM)	113
5.2	多普勒相位的计算方法	122
5.3	确定性瑞利过程的衰落时间间隔	124
第 6 章	频率非选择性随机信道模型和确定性信道模型	132
6.1	Suzuki 扩展过程 I 型	133
6.1.1	短期衰落的建模与分析	134
6.1.1.1	幅度和相位的概率密度函数	141
6.1.1.2	电平通过率和平均衰落持续时间	142
6.1.2	长期衰落的建模与分析	144
6.1.3	随机 Suzuki 扩展过程 I 型	148
6.1.4	确定性 Suzuki 扩展过程 I 型	151
6.1.5	仿真结果和应用	155
6.2	Suzuki 扩展过程 II 型	159
6.2.1	短期衰落的建模和分析	159
6.2.1.1	幅度和相位的概率密度函数	164
6.2.1.2	电平通过率和平均衰落持续时间	166
6.2.2	随机 Suzuki 扩展过程 II 型	170
6.2.3	确定性 Suzuki 扩展过程 II 型	174
6.2.4	仿真结果和应用	177
6.3	广义莱斯过程	180
6.3.1	随机广义莱斯过程	180
6.3.2	确定性广义莱斯过程	184

6.3.3	仿真结果和应用	187
6.4	Loo 修正模型	188
6.4.1	随机 Loo 修正模型	189
6.4.1.1	自相关函数和多普勒功率谱密度	191
6.4.1.2	幅度和相位的概率密度函数	195
6.4.1.3	电平通过率和平均衰落持续时间	197
6.4.2	确定性 Loo 修正模型	201
6.4.3	仿真结果和应用	205
第 7 章	频率选择性随机信道模型和确定性信道模型	208
7.1	PARSONS 和 BAJWA 的椭圆模型	210
7.2	频率选择性信道的系统理论描述	211
7.3	频率选择性随机信道模型	215
7.3.1	相关函数	215
7.3.2	Bello 的 WSSUS 模型	217
7.3.2.1	WSS 模型	217
7.3.2.2	US 模型	218
7.3.2.3	WSSUS 模型	218
7.3.3	基于 COST 207 的信道模型	224
7.4	频率选择性确定性信道模型	228
7.4.1	频率选择性确定性信道模型的系统函数	228
7.4.2	DGUS 模型的相关函数和功率谱密度	233
7.4.3	DGUS 模型的延迟功率谱密度、多普勒功率谱密度和特征量	236
7.4.4	DGUS 模型的模型参数确定	239
7.4.4.1	离散传播时延和时延系数的确定	241
7.4.4.2	离散多普勒频率和多普勒系数的确定	242
7.4.4.3	多普勒相位的确定	243
7.4.5	基于 COST 207 的信道模型的确定性仿真模型	244
第 8 章	快速信道仿真器	247
8.1	离散确定性过程	247
8.2	离散确定性过程的实现	250
8.2.1	表系统	250
8.2.2	矩阵系统	253
8.2.3	移位寄存器系统	254

8.3	离散确定性过程的性质	255
8.3.1	离散确定性过程的基本特性	255
8.3.2	离散确定性过程的统计特性	262
8.3.2.1	幅度和相位的概率密度函数和累积分布函数	262
8.3.2.2	电平通过率和平均衰落持续时间	270
8.4	实现开销和仿真速度	271
8.5	与滤波法的比较	273
附录 A	Jakes 功率谱密度和相应的自相关函数的推导	276
附录 B	具有基本高斯随机过程不同谱形状的莱斯过程的电平通过率的推导	279
附录 C	确定性莱斯过程的电平通过率和平均衰落持续时间的精确解的推导	282
附录 D	在 Jakes 功率谱密度下应用蒙特卡罗法引入的相对模型误差的分析	291
附录 E	基于 COST 207 的其他 \mathcal{L} 路径信道模型的技术规范	293
MATLAB	程序	297
缩略语	326
符号	328
参考文献	340
索引	357

第1章 绪 论

1.1 移动无线系统的沿革

过去的几年,移动通信无疑已成为通信市场中增长最快的领域。专家们认为现在我们仅仅处于全球发展的起始阶段,未来几年,该领域还将得到相当大的发展。如果想要寻找导致这一快速变化发展的要素的话,人们立即就会发现有许多方面的原因。的确,通信服务的自由化、欧洲市场的开放和管制撤销,1 GHz 附近和 1 GHz 以上频率资源的开放以及改进的调制和编码技术,还有半导体工艺的快速发展(例如,大规模集成 CMOS 和 GaAs 技术),以及对特殊复杂环境中电磁波传播过程的深入了解,这些都对移动通信技术的发展做出了巨大的贡献。

这一巨大发展的起源可追溯到 40 多年前,当时的第一代移动无线系统是完全基于模拟技术的,其应用受到用户容量和接入能力的严格限制。德国的第一个移动通信网络服务于 1958—1977 年之间,当时被简单地命名为 A 网,并且是基于人工交换技术的。1972 年引入的 B 网首次使用了直接拨号功能。然而,在这一网络中呼叫方必须知道被叫方的位置,并且仅有的 27 000 的用户容量也很快被使用殆尽。1994 年 12 月 31 日 B 网退出使用。1986 年引入的蜂窝 C 网第一次使移动用户的自动定位和向下一个小蜂窝小区漫游成为可能,它工作在 450 MHz 的频率范围并拥有当时可供全德国范围使用的 750 000 的用户容量。

第二代移动无线系统以网络的数字化为特征。在欧洲发展的 GSM 标准(GSM: 移动特别小组)^①被广泛地认为是世界上最精心设计的标准。1992 年开始使用的 D 网是基于 GSM 标准的,它工作在 900 MHz 的频率范围并能提供当时可供全欧洲范围使用的用户容量。除此之外,从 1994 年开始同 D 网并行发展的 E 网(数字蜂窝系统,DCS 1800)工作在 1800 MHz 的频率范围,这两个网络仅仅在它们各自的频率范围上有所区别。然而,在英国 DCS 1800 被认为是 PCN(个人通信网络)。分析人士认为,到 2005 年底仅仅欧洲的移动电话用户数量将从现在的 92 000 000 增长到 215 000 000。相应地,欧洲从事这一行业的人员将从现在的 115 000 增长到 1 890 000(信息来源: Lehman Brothers Telecom Research Estimates)。

^① 如今 GSM 代表为“全球移动通信系统”标准。

与此同时，起源于欧洲的 GSM 标准在 1998(1997)年底被世界上 129(110)个国家接受，成为了全球移动通信标准。到 1997 年底全球网络运营商共经营 256 个 GSM 网络，有超过 70 300 000 的用户。但仅仅在一年之后(1998 年底)，GSM 网络的数量就增长到 324 个，有 135 000 000 的用户。除了 GSM 标准之外，欧洲电信标准协会(ETSI)针对无绳电话又引入了一个新的标准 DECT(Digital European Cordless Telephone, 欧洲数字无绳电话)。DECT 标准允许用户在 300 m 的范围之内以正常的步行速度移动时使用无绳电话。

在欧洲，第三代移动无线系统有望在 21 世纪初期引入全球移动通信系统(UMTS)和移动宽带系统(MBS)的情况下投入使用。UMTS 在欧洲的主要目标是把由第二代移动无线系统提供的各种不同的服务集成到一个广义系统中^[Nie92]。届时，个人用户可在任何时间、任何地点(汽车、火车、飞机等)被呼叫，并且还可通过一个广义终端使用所有的服务。基于同样的目的，IMT 2000(国际移动通信 2000)^②系统也在全球范围内使用。除此之外，UMTS/IMT 2000 的频率范围为 2 GHz，它还将提供多媒体服务和其他宽带服务，最大数据速率将达到 2 Mb/s。MBS 计划在 60~70 GHz 频率范围下提供数据速率高达 155 Mb/s 的宽带服务。这一构想的目标是用移动终端来覆盖从由光纤网络连接的基站到室内的区域。对 UMTS/IMT 2000 和 MBS 来说，卫星通信将起到至关重要的作用。

随着未来卫星通信的发展，可以期待的是移动通信系统可实现在全球范围内(除了那些基础设施较差的地区)使用。现在的 INMARSAT-M 系统所用的四颗同步卫星(高度为 35 786 km)将在本世纪末被中高度(中轨道，MEO)和低高度(低轨道，LEO)上的非同步卫星所替代。MEO 卫星系统的代表是 ICO，它由 12 颗运行在 10 354 km 高度的卫星组成。LEO 卫星系统的典型代表是 IRIDIUM(66 颗卫星，高度为 780 km)、GLOBALSTAR(48 颗卫星，高度为 1 414 km)和 TELEDESIC^③(288 颗卫星，高度为 1 400 km)^[Pad95]。1.6 GHz 的覆盖范围是为手持便携式终端设计的，这些终端的大小和质量跟今天的 GSM 移动电话几乎相同。1998 年 11 月 1 日，基于 IRIDIUM 卫星系统的第一个卫星电话网络投入运营。1999 年 4 月，一个 Iridium 卫星电话售价为 5999 马克(DM)，通话费用由距离不同决定，每分钟在 5~20 马克之间。尽管设备和通话费用都很昂贵，但据估计，在未来十年，全球将有 6 000 万用户购买卫星电话终端。

从今天的观点来看，这场技术沿革最终将引发第四代移动无线系统的发展。第四代移动通信系统的目标是综合宽带移动服务，这需要将移动通信的频率范围扩展到 100 GHz。

在引入每一个新发展的移动通信系统之前，都需要做大量的理论和实验研究。这些研究将有助于解决一些公众关心的实际问题，例如，现有的资源(能量、频率范围、劳动力、场地、资金)怎样才能用户在数量不断增长的情况下被更加经济地利用，以及怎样才

② IMT 2000 通常被认为是 FPLMTS (Future Public Land Mobile Telecommunications System, 未来公用陆地移动通信系统)。

③ 起初 TELEDESIC 计划使用 924 颗运行在高度介于 695~705 km 的卫星。

能既简单又便宜地给用户的安全可靠的数据传输。同时还包括对环境和健康风险的评估,因为当科技被大量地应用到市场时这些问题必然会存在,而越来越挑剔的公众却只能在一定的程度上容忍这些存在的问题。在新的传输技术发展过程中变得越来越重要的另一个限制条件是对现有系统的兼容性要求。为了解决与这些限制条件有关的技术问题,我们需要对移动通信信道的特性有一个充分的了解。本书中所讲述的移动无线信道(Mobile Radio Channel)是指用于在发射机和接收机之间传送信号的物理媒介^[Pro95]。然而,当信道被建模后,发射天线和接收天线的特性通常也包括在信道模型中。移动无线信道的基本特性将在后面讨论。在下面的分析中并没有考虑热噪声,如必要的话,热噪声可以单独加到移动信道的输出信号上。

1.2 移动无线信道的基本理论

在移动通信中,由于障碍物阻挡了视距路径,发出的电磁波通常不能直接到达接收天线。事实上,接收到的电磁波是由建筑物、树木及其他障碍物导致的反射、衍射和散射而产生的来自不同方向的波叠加而成的。这种现象称为多径传播。一个典型的陆地移动信道场景如图1.1所示。由于多径传播,接收信号是由无数个经过衰减、时延和相移之后的发射信号叠加而成的。由于每一个来波(Partial Wave)的相位都不同,因此这种叠加可能是相长的或相消的。除此之外,当传送数字信号时,发送的脉冲信号在传播过程中可能会产生失真,并且由于多径传播,在接收端常常会出现几个可辨识的独立脉冲,这种现象被称为脉冲色散。脉冲色散的值取决于来波的传输时延差和振幅之间的关系。随后,我们将看到多径传播在频域中表现为移动信道转移函数的非理想频率响应。因而,传输信号的频率响应特性在信道中将会失真。由多径传播引起的失真是线性的,这种失真需要在接收端进行补偿,例如可通过均衡器来进行。

除了多径传播,多普勒效应同样会对移动信道的传输特性产生负面影响。由于移动单元的运动,多普勒效应将引起每个来波的频移。如图1.2所示,由第 n 条入射波的入射方向和移动单元的运动方向定义的入射角 α_n 按照如下关系式决定第 n 条入射波的多普勒频率(多普勒频移):

$$f_n := f_{\max} \cos \alpha_n \quad (1.1)$$

式中, f_{\max} 是与移动单元的速度 v 、光速 c_0 和载波频率 f_0 的关系可以用数学表达式表示如下:

$$f_{\max} = \frac{v}{c_0} f_0 \quad (1.2)$$

当 $\alpha_n = 0$ ($\alpha_n = \pi$)时,得到最大(最小)多普勒频率即 $f_n = f_{\max}$ ($f_n = -f_{\max}$),当 $\alpha_n = \pi/2$ 和