

国外电子与通信教材系列

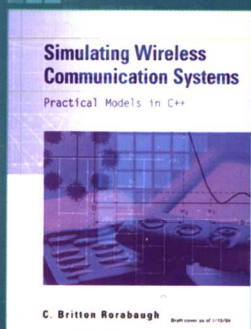


# 无线通信系统仿真

## —— C++实用模型

Simulating Wireless Communication Systems

Practical Models in C++



[美] C. Britton Rorabaugh 著

王昕 关欣 马杰 等译

滕建辅 审校



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry  
<http://www.phei.com.cn>

国外电子与通信教材系列

# 无线通信系统仿真

## —— C++ 实用模型

Simulating Wireless Communication Systems  
Practical Models in C++

[美] C. Britton Rorabaugh 著

王昕 关欣 马杰 等译  
滕建辅 审校

电子工业出版社  
Publishing House of Electronics Industry  
北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书是作者从事大型现代通信系统仿真工作 20 余年的经验总结, 利用 C++ 语言系统地讲解了复杂无线通信系统中各类模块的仿真原理与方法, 并给出了大量实用的模型源代码。作者在本书编写过程中开发了工具包 PracSim, 这是一个由仿真模型和可互连的仿真结构组成的模块集, 可以为用户提供一个可修改及开发的基础模型, 以便能更接近用户所需仿真的系统。书中仿真结构和模型的源代码均可在 Prentice Hall 的网站上获得。通过本书的学习可使读者掌握无线通信系统仿真的基本方法, 从而加深对无线通信和面向对象编程的理解, 为从事通信领域的相关研究工作打下坚实的基础。

本书内容丰富、实用性强, 非常适合国内目前的需求。可作为高等院校信息类专业高年级本科生和研究生的通信系统仿真课程的教材, 也可供相关工程技术人员参考使用。

Simplified Chinese edition Copyright © 2005 by PEARSON EDUCATION ASIA LIMITED and Publishing House of Electronics Industry.

Simulating Wireless Communication Systems: Practical Models in C++, ISBN 0130222682 by C. Britton Rorabaugh, Copyright © 2004. All Rights Reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall PTR.

This edition is authorized for sale only in the People's Republic of China (excluding the Special Administrative Region of Hong Kong and Macau).

本书中文简体字翻译版由电子工业出版社和 Pearson Education 培生教育出版亚洲有限公司合作出版。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。

本书封面贴有 Pearson Education 培生教育出版集团激光防伪标签, 无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2004-4324

### 图书在版编目 ( CIP ) 数据

无线通信系统仿真——C++ 实用模型 / (美) 罗雷鲍 (Rorabaugh, C. B.) 著; 王昕等译.

北京: 电子工业出版社, 2005.11

(国外电子与通信教材系列)

书名原文: Simulating Wireless Communication Systems: Practical Models in C++

ISBN 7-121-01908-6

I. 无... II. ①罗... ②王... III. ①无线电通信 - 通信系统 - 系统仿真 ②C 语言 - 程序设计  
IV. ①TN92 ②TP312

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 127265 号

责任编辑: 杜闽燕

印 刷: 北京东光印刷厂

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

经 销: 各地新华书店

开 本: 787 × 1092 1/16 印张: 24.25 字数: 684 千字

印 次: 2005 年 11 月第 1 次印刷

定 价: 39.00 元

凡购买电子工业出版社的图书, 如有缺损问题, 请向购买书店调换; 若书店售缺, 请与本社发行部联系。联系电话: (010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

## 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,除了依靠高校的老师 and 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。

吴佑寿

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 and 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 杨千里	北京邮电大学校长、教授、博士生导师 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
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
	徐安士	北京大学教授、博士生导师、电子学系主任 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	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、移动通信国家重点实验室主任
	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
	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委员
	郑宝玉	南京邮电大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	朱世华	西安交通大学副校长、教授、博士生导师、电子与信息工程学院院长 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
	彭启琮	电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长 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委员
	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、秘书长
	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 教育部电子信息科学与电气信息类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学院院长
	范平志	西南交通大学教授、博士生导师、计算机与通信工程学院院长

# 译者序

从20世纪90年代至今,信息技术飞速发展,通信技术和网络技术日新月异,通信系统的复杂度也越来越高。在这种情况下,传统的分析方法不再适应新技术发展的需求,因此迫切要求使用先进的技术来设计和评估通信系统。正是在这样的背景下,计算机仿真技术逐渐成为通信系统设计和分析的一种重要手段以及必备工具。

本书是作者从事大型现代通信系统仿真科研工作20余年的经验总结,利用C++面向对象程序设计语言系统地讲解了复杂无线通信系统中各类模块的仿真原理与方法,并给出了大量非常实用的模型源代码。读者可以从本书配套网站<http://authors.phptr.com/rorabaugh>上获取书中介绍的所有软件模块,并将这些模块直接用于自己的系统仿真中,也可以在做一定的修改后使用。这样既方便了读者理解仿真的实现过程,又能帮助读者开发新的仿真程序。本书可作为高等院校信息类专业高年级本科生和研究生相关课程的教材,通过本书的学习可使读者掌握无线通信系统仿真的基本方法,从而加深对无线通信和面向对象编程的理解,为从事通信领域的相关研究工作打下坚实的基础。

本书的前言及第1章至第3章由关欣博士负责翻译,第4章至第7章由马杰博士负责翻译,第8章至第10章由李镛博士负责翻译,第11章至第16章及附录由王昕博士负责翻译,滕建辅教授对全书进行了审校。在此衷心感谢参加本书初稿翻译和校对工作的刘航、邢喆、沈卫杰、张超、叶敏、陈冰、马爱萍等同志,另外还要感谢出版社的编辑们对我们工作的大力支持。

本书在翻译过程中对原著中的多处印刷错误进行了纠正。鉴于译者水平有限,书中难免有一些不当及错误之处,恳请各位专家和读者批评指正。

# 前 言

如果不进行仿真,那么完成现代通信系统并且了解这些系统内装置的工作情况将是不可能的。然而实际中专门讲述通信系统仿真的资料却少之又少。写作本书的初衷正是为了收集和整理采用 C++ 语言来仿真无线通信系统的各种技术。根据我的经验,现在各研究机构正面临需要马上进行通信系统仿真的任务,于是,甚至没有考虑可以选择采用 C++ 语言来自建仿真系统,便购置了诸如 SPW 或 MATLAB Simulink 等的商业仿真工具包。一开始,利用这些商业工具包中的标准库模型的确可以很快地进行简单系统的仿真。然而当需要对系统特性较复杂部分进行仿真时,这些研究机构才意识到采用商业工具包降低了仿真的可控性和灵活性。而且任何库中的模型也不可能涵盖通信系统仿真的方方面面,总是需要建立专门的模型或者修改已有模型。对于用户来说,采用商业工具包与处理模型算法本身的细节相比,通常需要花费更多的精力来处理仿真结构方面的规则和限制。

20 世纪 90 年代中期,作为系统工程师和首席设计人员,我参与了美国几个大型国防系统中无线数据通信链路特性仿真工具包的研制。这个工具包并不完善——正如软件从来都很难完善一样——但我从中获得了一些宝贵的经验。而且在编写本书的过程中,我开发了一个简化的工具包,它不像我过去所做的工具包那样复杂和专用化。这个新的工具包叫做 PracSim,即 Practical Simulation 的缩写。Prentice Hall 的网站上 (<http://authors.phptr.com/rorabaugh/>) 提供了 PracSim 工具包中所有模型和系统架构的源代码。这些代码作为例子将贯穿全书进行讨论。PracSim 模型库并不力求完备,而是为用户提供一个可修改和开发的基础模型,这样将更接近于用户所需仿真的系统。

虽然没有准确统计过,但我确信,在 PracSim 软件上花的时间要比写作本身多得多。在此,我要感谢我的妻子 Joyce、儿子 Geoffrey、女儿 Amber 和岳母 Eleanor,她们没有埋怨我将所有的时间都花在写作上,还承担了我总是没时间做的家务。还要感谢耐心的编辑 Bernard Goodwin,允许我三番五次地拖延交稿。



## 关于本书的网站

本书配套网站<http://authors.phptr.com/rorabaugh>中给出了书中用于说明通信器件和系统各种建模方法的相应软件。本书对这些软件或者直接讨论，或者在仿真实例中介绍其具体用法。因此，网站无需大量解释，只要对软件使用时相关的目录结构进行简单说明。

- 软件模型的总体系统与顶层目录均命名为 PracSim。
- 每个仿真都需要一个与 sims 目录中给出的实例类似的主程序。
- nonsims 目录中给出了几个非仿真主程序。
- support 目录中包括为执行诸如信号定义、错误处理、信号输出产生、参数输入读取以及结果报告等一般任务的仿真基本结构所需的类和程序。
- 所有的独立模型，以及 PracSimModel 基类均包含在 models 目录中。
- utils 目录中包括支持函数，这些函数并非仿真基本结构的完整部分，包括特殊数学函数、各种调制方法的理论结果及统计函数。
- 所有的 C++ 头文件均包含在 include 目录中。
- PracSim 目录下的所有其他目录都包含 Microsoft Visual Studio.Net 2003 项目，其中每个项目都能实现一个用于说明本书所讨论的特殊通信器件或系统的建模方法的仿真。

# 目 录

第 1 章 仿真：背景及回顾 .....	1
1.1 通信系统 .....	1
1.2 仿真过程 .....	1
1.3 仿真程序 .....	2
第 2 章 仿真基础结构 .....	3
2.1 参数输入 .....	3
2.1.1 各参数值 .....	3
2.1.2 参数数组 .....	4
2.1.3 枚举类型参数 .....	5
2.1.4 系统参数 .....	5
2.1.5 信号绘图参数 .....	5
2.2 信号 .....	6
2.2.1 信号管理策略 .....	6
2.2.2 信号管理系统的实现 .....	13
2.3 控制信号 .....	18
2.4 结果报告 .....	19
附录 2A 源代码实例 .....	21
第 3 章 信号发生器 .....	28
3.1 基本信号发生器 .....	28
3.1.1 单位阶跃函数 .....	28
3.1.2 矩形脉冲 .....	29
3.1.3 单位冲激 .....	29
3.1.4 软件实现 .....	30
3.2 音频信号发生器 .....	31
3.2.1 软件实现 .....	31
3.3 基带信号采样 .....	33
3.3.1 采样的频域特性 .....	33
3.4 基带数据波形发生器 .....	34
3.4.1 非归零 NRZ 基带信号 .....	35
3.4.2 双相位基带信号 .....	36
3.4.3 延迟调制 .....	37
3.4.4 应用中的问题 .....	38
3.5 为带通信号建模 .....	39

附录 3A 源代码实例 .....	40
第 4 章 随机过程模型 .....	50
4.1 随机序列 .....	50
4.1.1 离散分布 .....	50
4.1.2 离散随机过程 .....	52
4.2 随机过程发生器 .....	53
4.2.1 线性同余序列 .....	53
4.2.2 软件实现 .....	57
4.2.3 随机数发生器的评价 .....	58
4.3 连续时间噪声过程 .....	59
4.3.1 连续随机变量 .....	59
4.3.2 随机过程 .....	61
4.4 加性高斯噪声发生器 .....	62
4.4.1 高斯分布 .....	62
4.4.2 误差函数 .....	63
4.4.3 谱特性 .....	63
4.4.4 噪声功率 .....	64
4.4.5 高斯随机数发生器 .....	64
4.5 通带噪声 .....	66
4.5.1 包络和相角 .....	66
4.5.2 瑞利随机数发生器 .....	68
4.6 随机过程的参数模型 .....	69
4.6.1 自回归噪声模型 .....	69
附录 4A 源代码实例 .....	71
第 5 章 离散变换 .....	76
5.1 离散傅里叶变换 .....	76
5.1.1 参数选择 .....	76
5.1.2 离散傅里叶变换的性质 .....	77
5.2 时域抽取算法 .....	78
5.2.1 软件注释 .....	80
5.3 频域抽取算法 .....	83
5.4 小采样数 $N$ 的离散傅里叶变换 .....	86
5.5 素因数算法 .....	86
5.5.1 软件注释 .....	88
附录 5A 源代码实例 .....	89
第 6 章 谱估计 .....	93
6.1 采样频谱 .....	93
6.1.1 软件实现 .....	93

6.2	Daniell 周期图 .....	95
6.2.1	软件实现 .....	95
6.3	Bartlett 周期图 .....	96
6.3.1	软件实现 .....	97
6.4	加窗和其他问题 .....	98
6.4.1	三角窗 .....	98
6.4.2	软件考虑 .....	100
6.4.3	von Hann 窗 .....	102
6.4.4	汉明窗 .....	103
6.4.5	软件实现 .....	104
6.5	Welch 周期图 .....	107
6.5.1	软件实现 .....	107
6.6	Yule-Walker 方法 .....	107
6.6.1	软件实现 .....	108
附录 6A	源代码实例 .....	109
第 7 章	系统表征工具 .....	117
7.1	线性系统 .....	117
7.1.1	线性系统的特性 .....	117
7.1.2	传递函数 .....	118
7.1.3	传递函数的计算机表示方法 .....	119
7.1.4	幅频响应、相频响应和时延响应 .....	122
7.2	星座图 .....	123
7.2.1	眼图 .....	125
附录 7A	源代码实例 .....	128
第 8 章	滤波器模型 .....	134
8.1	建模方法 .....	134
8.1.1	数值积分 .....	134
8.1.2	频率响应采样 .....	134
8.1.3	数字滤波器 .....	135
8.2	模拟滤波器响应 .....	135
8.2.1	低通滤波器幅频响应特性 .....	136
8.2.2	滤波器转换 .....	137
8.3	经典模拟滤波器 .....	141
8.3.1	巴特沃斯滤波器 .....	141
8.3.2	切比雪夫滤波器 .....	142
8.3.3	椭圆滤波器 .....	144
8.3.4	贝塞尔滤波器 .....	147
8.4	由数值积分来仿真滤波器 .....	148

8.4.1	双二次型 .....	149
8.4.2	软件设计 .....	151
8.5	用 IIR 数字滤波器仿真模拟滤波器 .....	152
8.5.1	IIR 滤波器的性质 .....	153
8.5.2	模拟滤波器映射为 IIR 数字滤波器 .....	154
8.5.3	软件设计 .....	156
8.6	频域内滤波 .....	157
8.6.1	快速卷积 .....	157
8.6.2	软件设计 .....	160
附录 8A	源代码实例 .....	161
第 9 章	调制与解调 .....	171
9.1	仿真的要点 .....	171
9.1.1	利用恢复的载波 .....	171
9.2	正交相移键控 .....	172
9.2.1	非理想特性 .....	173
9.2.2	正交调制器模型 .....	175
9.2.3	QPSK 相关解调器模型 .....	175
9.2.4	正交解调器模型 .....	178
9.2.5	QPSK 仿真 .....	180
9.2.6	QPSK 信号的性质 .....	182
9.2.7	偏移 QPSK .....	185
9.3	二进制相移键控 .....	186
9.3.1	BPSK 调制器模型 .....	187
9.3.2	BPSK 解调 .....	188
9.3.3	BPSK 仿真 .....	189
9.3.4	BPSK 信号的性质 .....	190
9.3.5	误差性能 .....	191
9.4	多进制相移键控 .....	192
9.4.1	理想的 $m$ -PSK 调制与解调 .....	193
9.4.2	$m$ -PSK 信号的功率谱密度 .....	194
9.4.3	误差性能 .....	195
9.5	频移键控 .....	196
9.5.1	FSK 调制器 .....	198
9.6	最小频移键控 .....	200
9.6.1	非理想特性 .....	200
9.6.2	MSK 调制器模型 .....	202
9.6.3	MSK 信号的性质 .....	204
附录 9A	源代码实例 .....	206

第 10 章	放大器与混频器 .....	213
10.1	无记忆非线性 .....	213
10.1.1	硬限幅器 .....	213
10.1.2	带通放大器 .....	217
10.2	非线性放大器的表征 .....	223
10.2.1	AM/AM 与 AM/PM .....	223
10.2.2	扫频响应 .....	223
10.3	双模块非线性放大器模型 .....	224
10.3.1	滤波器测量 .....	224
附录 10A	源代码实例 .....	228
第 11 章	同步与信号的移动 .....	232
11.1	信号的时移 .....	232
11.1.1	整数倍采样间隔的信号延迟 .....	232
11.1.2	多个采样间隔的信号超前 .....	235
11.1.3	经过插值的连续时间延迟 .....	238
11.2	基于相关的延迟估计 .....	249
11.2.1	软件实现 .....	251
11.3	相位斜率延迟估计 .....	253
11.4	时钟速率的变化 .....	256
附录 11A	源代码实例 .....	259
第 12 章	同步恢复 .....	265
12.1	线性锁相环 .....	265
12.2	数字锁相环 .....	268
12.2.1	相频检测器 .....	269
12.3	锁相解调器 .....	275
12.3.1	平方环 .....	276
12.3.2	科斯塔斯环 .....	276
附录 12A	源代码实例 .....	280
第 13 章	信道模型 .....	288
13.1	离散无记忆信道 .....	288
13.1.1	二进制对称信道 .....	288
13.1.2	其他二进制信道 .....	289
13.1.3	非二进制信道 .....	290
13.2	时变随机信道特性 .....	293
13.2.1	系统函数 .....	294
13.2.2	随机时变信道 .....	297
13.3	多径弥散信道 .....	300

13.3.1	非相关抽头增益 .....	301
13.3.2	相关抽头增益 .....	301
13.4	离散多径信道 .....	303
<b>第 14 章</b>	<b>多速率仿真 .....</b>	<b>305</b>
14.1	多速率信号处理的基本概念 .....	305
14.1.1	整数倍抽取 .....	305
14.1.2	整数倍内插 .....	306
14.1.3	非整数倍抽取和内插 .....	308
14.2	插值和抽取滤波器的设计 .....	308
14.2.1	内插 .....	308
14.2.2	抽取 .....	314
14.3	带通信号的多速率处理 .....	318
14.3.1	正交解调 .....	318
14.3.2	正交调制 .....	319
<b>第 15 章</b>	<b>DSP 元件建模 .....</b>	<b>320</b>
15.1	量化和有限精度算法 .....	320
15.1.1	系数量化 .....	320
15.1.2	信号量化 .....	321
15.1.3	有限精度算法 .....	322
15.2	FIR 滤波器 .....	323
15.3	IIR 滤波器 .....	327
<b>第 16 章</b>	<b>编码和交织 .....</b>	<b>329</b>
16.1	分组码 .....	329
16.1.1	循环码 .....	329
16.2	BCH 码 .....	331
16.3	交织器 .....	332
16.3.1	分组交织器 .....	333
16.3.2	卷积交织器 .....	333
16.4	卷积码 .....	334
16.4.1	卷积编码器的网格图表示 .....	336
16.4.2	维特比译码 .....	336
16.5	使用软判决的维特比译码 .....	342
<b>附录 A</b>	<b>数学工具 .....</b>	<b>345</b>
<b>附录 B</b>	<b>通信中的概率分布 .....</b>	<b>349</b>
<b>附录 C</b>	<b>伽罗华域 .....</b>	<b>353</b>
<b>附录 D</b>	<b>参考文献 .....</b>	<b>365</b>
<b>索引</b>	<b>.....</b>	<b>368</b>

# 第1章 仿真：背景及回顾

如果没有仿真,那么要进行现代通信系统设计以及了解这些系统内装置的工作情况将是不可能的。数字信号处理技术的广泛应用推动了移动电话和无线接收设备等产品的研发,这些产品在每单位成本上提供了令人难以置信的性能和特性,使每个人都能消费得起。然而,低单位成本是通过对一个设计进行成千上万的批量生产获得的。要设计一款新的移动电话或PDA的无线调制解调器是一项非常复杂且耗资巨大的工作。由于这些产品非常复杂,只能通过仿真对设计做大量的测试和修改,用面包板搭建产品的原型来做测试是不实际的。即使装置的原型做出来了,要测试它在每种工作条件下的性能也是不切实际的。例如,CDMA和GSM移动电话系统的特性决定了在某一区域内的所有移动电话都不可避免地相互干扰。移动终端和基站中都做了减弱这种相互干扰的处理,但干扰的程度以及所采取的措施是否有效取决于各个可能互相干扰的移动终端相对于基站的位置。根据运行于移动终端的功率控制环或者对来自基站命令的响应情况,各个移动终端将调整发射功率,这又使对干扰的分析变得更加复杂。对干扰的分析是不可能的,做大量测试也是不切实际的。因此,用精心构建的移动终端和基站的模型来进行仿真是惟一的途径。几乎在每类通信设备的设计中,在开始构建原型机的昂贵过程之前,仿真可以用较少的花费来验证各种可能性并进行折中设计。

## 1.1 通信系统

一个大型复杂的通信系统要正常工作会涉及到许多方面,各种各样的仿真恰好可以用来评估系统在这些方面的性能。以典型的蜂窝式移动电话系统为例,最底层为移动电话与基站天线间的无线链路。由于存在加性噪声,其他移动电话、其他天线和其他非蜂窝式人为干扰源的干扰,以及射频信号的衰减和多径衰落,使得该链路的性能变差。系统工程师会采取一些技术来减小这些破坏源的影响。可采用的技术包括:选择调制技术、实施功率控制、改善接收设备的灵敏度、分集、纠错编码、交织、均衡、RAKE解调器设计和去除干扰。解析地评价这些技术的各种组合的性能常常是困难、不可能的。仿真通常是估计链路性能惟一实用的方法,而不必实际建造并测试链路。本书介绍了与链路性能有关的仿真技术。移动终端至基站链路的其他方面包括对模拟局域网协议类的离散事件仿真,相关内容见参考文献[1]。对特殊地理位置区群调度性能的评估将用到离散事件仿真的变体,该调度涉及州际高速公路附近快速移动终端的区群切换。

## 1.2 仿真过程

整个仿真过程开始于对被仿真系统的分析。显然,该分析取决于系统的本质和设计的成熟程度。如果系统已经设计完成,则可以立即将仿真的主要精力放在选取和开发系统各组成部分的高精度模型上。此外,如果仿真是为了确定系统的结构,那么仿真就要从书本中的有损信道模型和理想子系统开始。在许多卫星通信系统中,卫星上的发射功率放大器导致信号严重失真,因此,系统其他部分的设计要能容许失真或者减小失真。在系统结构设计的初期,功率放大器采用高精度模型,其他器件采用理想化或典型性能模型来做仿真,该仿真要能确定通过发射器的预失真、接收器的均衡或二者兼而有之等措施是否能将放大器引起的失真减至最小。



在仿真初期,对系统性能的粗略估计可直接采用本书中介绍的调制器、解调器、编解码器和均衡器的理想模型。商业仿真工具包中所含的通常都是这样的理想模型。在某些情况下,必须采用实际器件的二阶和三阶高精度模型进行仿真。当比特率为110 bps时,可采用数字信号处理(DSP)技术来实现均衡器,采用固定模型仿真量化过程可以在性能与成本、复杂度之间灵活地做折中设计。当比特率为1 gbps时,均衡器需要采用模拟技术来实现,此时,通过测试和电路级仿真验证了的手工实现的模型就要能够模拟即使在一流设计中也不可避免的失真。非线性功率放大器的模型也要经过对实际器件的测试来验证。

### 1.3 仿真程序

三十年前,对大型通信系统所做的少量仿真采用的是很长的、手工编写的FORTRAN程序。由于仿真的计算量很大而且受制于当时计算机的速度,这些程序是关系紧凑的整段代码,仅在要用汇编语言编写的某些部分才用到子程序。现在的仿真采用模块工具包——无论专门的还是用户定制的——都强调了应用的灵活性和易用性。

PracSim是一个由仿真模型和可互连的仿真结构组成的模块集,它是在编写本书的过程中开发的。有关仿真结构的内容将在第2章中介绍,有关模型的内容将贯穿所有其他章节的始末。仿真结构和模型的源代码可以在Prentice Hall的网站上(<http://authors.phptr.com/rorabaugh/>)获得。模型中包括引起系统性能下降的信源,这样的信源在课本模型中通常不做讨论,而对一些流行的商业仿真工具做了介绍。然而,这些模型不是真正“工业级”的,因为编写其内部代码时考虑的是讲授时的明晰而非最优的运行速度。