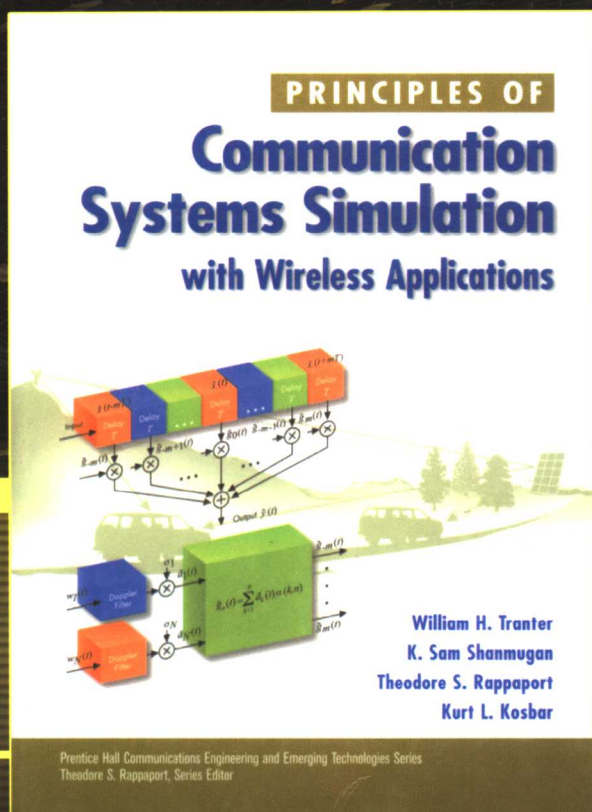


通信系统仿真原理 与无线应用

Principles of Communication Systems Simulation with Wireless Applications

(美) William H. Tranter
K. Sam Shanmugan 著
Theodore S. Rappaport
Kurt L. Kosbar

肖明波 杨光松 许芳 席斌 等译
姚彦 肖明波 审校



电子与电气工程丛书

通信系统仿真原理 与无线应用

Principles of Communication Systems
Simulation with Wireless Applications

William H. Tranter
(美) K. Sam Shanmugan 著
Theodore S. Rappaport
Kurt L. Kosbar

肖明波 杨光松 许芳 席斌 等译
姚彦 肖明波 审校



机械工业出版社
China Machine Press

本书系统地介绍通信系统（包括无线通信系统）的设计、分析和仿真方法，还提供了大量极具参考价值的仿真实例。本书的全部仿真程序都是采用MATLAB编写的，这不仅方便读者理解仿真的实现过程，还允许读者修改或使用这些代码段来进行自己的仿真开发。章后提供了大量的参考文献和经过精心设计的各类练习题，方便教学。

本书适合作为高等院校通信、电子、信息等专业高年级本科生或低年级研究生相关课程的教材和参考书，也可供通信领域的科研技术人员参考。

Simplified Chinese edition copyright © 2004 by Pearson Education Asia Limited and China Machine Press.

Original English language title: *Principles of Communication Systems Simulation with Wireless Applications* by William H. Tranter, K. Sam Shanmugan, Theodore S. Rappaport, Kurt L. Kosbar, Copyright © 2004.

All rights reserved.

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

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。

版权所有，侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

本书版权登记号：图字：01-2004-0890

图书在版编目（CIP）数据

通信系统仿真原理与无线应用/（美）传特（Tranter, W. H.）等著；肖明波等译。
—北京：机械工业出版社，2005.6

（电子与电气工程丛书）

书名原文：Principles of Communication Systems Simulation with Wireless Applications

ISBN 7-111-16197-1

I. 通… II. ①传… ②肖… III. 通信系统-系统仿真 IV. TN914

中国版本图书馆CIP数据核字（2005）第016338号

机械工业出版社（北京市西城区百万庄大街22号 邮政编码 100037）

责任编辑：吴怡 徐晓良

北京牛山世兴印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005年6月第1版第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·32.25印张

印数：0 001-4000册

定价：59.00元

凡购本书，如有倒页、脱页、缺页，由本社发行部调换
本社购书热线：（010）68326294

译者序

随着信息技术的迅猛发展，通信系统在性能不断提高的同时也变得越来越复杂。正因为如此，采用传统技术对通信系统进行分析的日子已经一去不复返，而计算机仿真方法则由于其廉价性、高效性和灵活性，成为了通信产业中的主要设计和分析手段之一。另一方面，计算机仿真更是进行通信与网络等方面科研时所必备的工具。然而，目前许多学生都缺乏这个环节的系统训练，得出来的仿真结果往往可信度较差，甚至将“仿真”做成了“仿假”还不自知。因此，我们很高兴地将这本书翻译出来推荐给大家。

本书是在国际通信与信号处理领域里享有盛誉的几位重量级教授总结多年教学和科研成果推出的一部力作。它不仅系统地介绍了通信系统（尤其是无线通信系统）的设计、分析和仿真方法，而且还提供了大量极具参考价值的仿真实例。本书的全部仿真程序都是采用MATLAB编写的，这不仅方便读者理解仿真的实现过程，还允许读者修改或使用这些代码段来进行自己的仿真开发。几乎每一章后面都提供了大量的参考文献和经过精心设计的各类练习题。因此，本书非常适合作为高等院校通信、电子、信息等专业低年级研究生或高年级本科生相关课程的教材。我们相信通过对本书进行系统学习，读者不仅可以更深入地理解“通信原理”和“移动通信”等课程的内容，而且还可以掌握必要的仿真技能，为将来的科研和工作打下牢固的基础。另外，本书对于通信领域的科研技术人员以及相关专业的教师也不失为一本有价值的参考书。

本书分成三大部分，共18章。第一部分为概论，讨论了仿真的作用和方法论。第二部分为基本方法部分，主要介绍了采样定理及其在仿真中的应用、带通信号的低通表示、滤波器模型及数字滤波器的仿真、锁相环的仿真、随机数的产生、后处理、通信系统的蒙特卡罗仿真和半解析仿真以及无线通信系统的仿真方法论。第三部分是高级建模与仿真方法，着重论述了非线性系统的仿真、时变系统建模、波形信道模型、离散信道模型以及高效仿真方法。这一部分还专门讨论了无线蜂窝通信系统仿真中的特殊问题，并总结性地给出了两个仿真实例。

本书由肖明波、杨光松、许芳和席斌等人翻译。姚彦教授和肖明波教授对全书进行了审校。参加本书初稿翻译、校对、讨论、文字整理和公式录入等工作的还有时斌、卢菲恬、徐位凯、庄铭杰、卢贵主、高志斌、叶丽芬、郑旭琴、陈浩等人。衷心感谢清华大学电子工程系肖立民副教授及其同事在百忙中对翻译稿提出了宝贵的修改意见。在此还要衷心感谢机械工业出版社华章分社的编辑们给予我们的大力支持。

整个翻译过程中，我们在取得作者确认的情况下，对原书中出现的多处错误做了订正。由于译者水平有限，加上时间紧迫，译文中难免出现新的不妥当乃至错误之处，敬请读者和专家不吝赐教。

前 言

本书是通信和计算机这两个相关技术近期快速发展的产物。在过去的几十年中，通信系统变得越来越复杂，以至于没有相当程度的计算机支持，就无法再进行系统设计和性能分析。50年前的不少通信系统要么是功率受限的，要么是噪声受限的。在许多这种系统中，使性能恶化的一个重要因素是热噪声，它可用加性高斯白噪声信道来建模。然而，许多现代通信系统（比如无线蜂窝系统）是运行在干扰和带宽受限的环境中。此外，人们对宽带信道和微型器件的渴求，也将传输频率推进到千兆赫兹范围。在这个频段，传播特性变得更复杂，而多径引起的衰落也是一个普遍存在的问题。为了减小这些负面影响，往往要采用复杂的接收机结构。比如，接收机中可能使用复杂的同步结构、解调器与符号估计器以及RAKE处理器。不采用计算机技术，很难对许多这种系统进行分析处理。要设计和分析这些系统，仿真往往必不可少。

微处理器和DSP技术的发展，推动了现代通信系统的发展，同时也为我们提供了高性能的数字计算机。现代工作站和个人计算机（PC）的计算能力已经大大超过了数年前使用的大型机。而且，现代工作站和PC价格低廉，因而可以配备在设计工程师们的桌面上。因此，基于仿真的设计和分析方法成为整个通信产业中广泛使用的实用工具。

也正因为如此，有关基于仿真的通信系统设计与分析的研究生课程也变得越来越普遍。学生可从这些课程中多方面受益。通过使用仿真，学生在通信课上可以学习到的系统工作特性比传统通信课上学到的更复杂和更实际，因为在传统通信课上必须将复杂性限制在较低的程度，以保证能够进行分析。仿真允许我们方便地改变系统参数，而且通过对仿真结果进行交互式 and 可视化的显示，可以迅速评估这些改变的影响。此外，通晓仿真方法对通信领域的许多研究生的研究工作也是一大支持。最后，学了仿真的学生在毕业后进入通信领域时，就掌握了业界所需要的技能。本书打算为这类课程提供支持。

本书讨论的许多应用和实例都是以无线通信系统为目标的，这样安排有几方面的原因。首先，许多学通信的学生最终将会在无线通信行业工作。其次，相当数量的研究生在大学里开展研究工作时，从事与无线通信相关的课题。最后，因为无线通信目前非常热门，许多研究生培养计划都包含了无线通信方面的课程。本书就是（至少部分是）为这类课程而写作的，同时也是为了满足从业工程师自学的需要。

本书分成三大部分。第一部分为概论，包括两章。第1章讨论了在分析和设计过程中使用仿真的动机。指明仿真实论涉及多个传统学科领域，比如数论、概率论、随机过程以及数字信号处理等。我们希望读者们能体会到，学习仿真可以将许多单独领域的知识综合在一起。本书讨论了不同类型的仿真以及多个用来进行仿真的软件包。本书的一个基本主题是开发合适的仿真模型和仿真方法论。第1章和第2章对模型开发的基本概念进行了介绍。第2章在一个很高的层面上集中讨论了方法论。整本书里用到的许多基本概念都在这里作了介绍。我们鼓励读者在学习本书其他章节内容时，经常回过头来重读这些内容。对这些内容的回顾将有助于读者在详细地探究具体概念的时候，对整体框架（big picture）仍有一个清晰的把握。

第二部分为基本概念与方法,包括九章(第3~11章)。这九章讲述了在几乎所有通信系统仿真中都会碰到的基本内容。第3章的主题是采样定理及其在仿真中的作用。这一章还涵盖了量化、脉冲成形(Pulse Shaping)以及脉冲成形对所需采样频率的影响。第4章的主题是带通信号的正交(quadrature)低通信号表示。这种表示法是仿真方法中的一个基本工具。这一章很关键,因为其中讨论的方法将在全书中反复使用。第5章的主题是滤波器模型及数字滤波器的仿真方法。滤波器当然是带记忆的,因而仿真滤波器比仿真系统中其他功能模块需要更多的计算。因此,要获得合理的运行时间,必须有效地仿真滤波器。第6章以案例研究形式讨论了锁相环的仿真。虽然在仿真学习的前期就讨论了这个内容,但读者们应该认识到,我们完全可以用此前学到的工具对一些重要问题进行研究。该案例研究集中考虑锁相环的捕捉特性。捕捉研究要使用非线性模型,因而,很难用传统方法进行分析。用于开发仿真的方法论在这一部分作了详尽讨论,也为本书以后章节的仿真开发提供了指南。第7章的主题是用来产生随机数的仿真方法。最初,集中考虑产生具有均匀概率密度函数(pdf)的伪随机序列。这包括基于伪噪声序列的线性同余方法和技术两方面。这一章还讨论了随机序列的pdf和功率谱密度(PSD)成形的几个方法。第8章的主题是后处理,即将仿真产生的数据处理成适于可视化和分析的形式。作为估计参数值的一种通用工具,第9章介绍蒙特卡罗仿真方法。这一章还介绍了无偏和一致估计器的概念,并研究了估计器的收敛性。第9章讨论的概念在第10章的通信系统中得到了应用。第10章专门讨论通信系统的蒙特卡罗仿真和半解析仿真。这一章还给出了几个简单的例子。第11章详细讨论了用于仿真缓慢变化环境下无线通信系统的方法论。这一章还强调了中断概率(Outage Probability)的计算,讨论了几个减少仿真运行时间的半解析方法。

本书第三部分是高级建模与仿真方法,介绍在开发高级仿真时遇到的一些专题。第12章专门讨论非线性系统的仿真。这一章强调了基于测量的模型开发,还介绍了许多已得到广泛应用的模型。第13章讨论时变系统,具体介绍了时变信道建模这一重要主题。第14章讨论波形信道的几个模型。运用前一章的内容,我们开发了多径衰落信道的模型。第15章继续研究信道模型,讨论了用符号级离散信道模型代替波形信道模型的方法。这样做的目的在于大规模地降低所需的仿真运行时间。使用的主要工具为Baum-Welch算法和隐式马尔可夫模型(hidden Markov model)。介绍了基于隐式马尔可夫模型的几个系统模型。第16章讨论了降低误比特率估计器方差的各种策略。这一章介绍了好几种策略,但着重强调的是重要性采样。第17章专门讨论无线蜂窝通信系统的仿真。蜂窝系统被证明是干扰受限而非噪声受限的系统。在许多系统中,同频干扰是性能恶化的一个主要因素。第18章以两个示例仿真结束全书。其中第一个例子考虑CDMA系统,并给出其仿真。在这个仿真中,误比特率是作为扩频处理增益、干扰源个数、功率-延时曲线和接收器输入端信噪比的函数计算出来的。仿真采集到的数据被用来构建一个基于隐式马尔可夫模型的离散信道模型。接下来用这个隐式马尔可夫模型统计重构信道差错事件。然后使用离散信道模型计算误比特率(BER),并将结果与使用波形级信道模型获得的结果作比较。第二个例子是运行在非线性信道上的一个FDM系统。我们使用半解析方法研究了交调失真对误比特率的影响。

从前面的介绍可以看出,本书覆盖面非常广。如果要对这里涉及的所有问题都进行完全严格的论述,书的容量将是目前的几倍,结果就会不适合于作教材。在撰写教材时总是需要在完整性和严格性方面进行折衷。在写作这本书时,我们尽力提供足够的严格性,使得结果易于理解同时又具有可信度。本书还给出了大量的参考文献,供欲作进一步研究的读者参考。

尽管本书是为通信专业一个学期的课程而写作的,里面包括的内容在一个学期内通常无法讲授完。依作者看来,使用本书作教材的所有课程应该包括前两部分(第1~11章)。在时

间允许的情况下，教师可以再从第三部分（第12~18章）中选择部分内容来完成授课。

在正文里，包括了许多用MATLAB写的计算机程序。决定在书的主体部分包含计算机代码有几方面的原因。首先，程序阐明了用于仿真开发的方法论，也阐明了用于许多重要DSP运算的算法。此外，读者可以使用包含在MATLAB例子里的许多代码段来进行自己的仿真开发。为了不打断行文，章节正文里仅包括了较短的程序，即长度不超过一页的程序。一页容不下的长程序都放在每章后面的附录里。这里包括的MATLAB代码都设计得易于为读者所理解。因此，许多MATLAB程序没有用最有效的方法编写（比如我们经常使用for循环来代替矩阵运算）。我们不建议读者照书本重新输入计算机代码。Prentice Hall出版社维护的一个网页包含了本书里面的所有计算机代码，可供下载。这个网页的URL为

<http://authors.phptr.com/tranter/>

这个网站上的MATLAB代码将会定期更新，以保证错误和疏漏之处得到及时的更正。

这里还要对选择MATLAB作些解释。作这个选择是出于好几方面的原因，这些原因将在第1章里详细讨论。其中的主要原因在于紧凑性（复杂的算法可以用很少的几行代码表示）、图形支持和已安装的平台。由于MATLAB在工程类课程中得到了广泛的应用，因此多数学生已经拥有运行这里包括的程序所需的资源。许多仿真程序涉及到较大的计算量，要获得合理的执行时间需要采用诸如C或C++之类的编译语言。在高信噪比的情况下，用来估计误比特率的蒙特卡罗仿真尤其如此。要获得高质量（低方差）的估计器，必须在信道上处理许多符号。然而，即使是这种情况，MATLAB也是一个功能强大的工具，因为可以用MATLAB开发原型（prototype）仿真，以设计和测试整个仿真和单独的信号处理算法。MATLAB代码可以变换成C或C++代码以提高运行效率，获得的结果和用MATLAB原型仿真的结果可以相媲美。使用MATLAB开发原型可以很快地找出概念性错误，而这往往会加快最终软件产品的开发。尽管SIMULINK是专为仿真而设计的，但本书没有使用它，因为使用MATLAB，学生才可以很清楚仿真程序使用的算法的细节和开发仿真代码的方法论。

致谢

许多同事、研究资助者和机构对本书贡献巨大。在本项写作计划的早期，美国国家自然科学基金（NSF）对弗吉尼亚理工大学的联合研究课程开发（CRCD）项目进行了资助。本书第3~10章和第17章的很大一部分内容的写作都属于这项工作的一部分。NSF项目经理Mary Poats鼓励我们在通信学科的课程计划中开设基于仿真的课程，我们感谢她的鼓励和支持。作者们感谢弗吉尼亚理工大学的Cyndy Graham具有的LaTeX技巧，也感谢她对这么大一个手稿的写作过程进行了管理。此外，各个作者有如下具体的致谢。

William H. Tranter感谢在密苏里大学罗拉分校，坎特伯雷大学（新西兰，基督城）弗吉尼亚理工大学曾使用讲义选修通信系统仿真课程的众多学生。这些讲义形成了本书的很大一部分基础。这些学生提出了许多宝贵的建议。特别感谢Jing Jiang在第10章的半解析估计器方面提供了帮助；Ihsan Akbar编写了第15章的马尔可夫和半马尔可夫模型估计器的许多代码（尤其是附录B、附录C和附录D中所包含的代码）；以及Bob Boyle开发了CDMA估计器，第18章的CDMA案例研究就是建立在这项工作的基础上的。他也要感谢Sam Shanmugan在本书写作的这些年里所提供的友谊、支持、鼓励以及最重要的耐性。还要感谢Des Taylor和Richard Duke通过坎特伯雷大学的Erskine奖金提供的资助，以及弗吉尼亚理工大学的Theodore Rappaport在一个学术假期间所提供的资助。正是在这个学术假期间，开始写作了本书前面几章的许多内容的初稿。

Sam Shanmugan想要感谢他在堪萨斯大学的同事和学生，他们在多方面对本书作出了贡

献。也要感谢位于新西兰基督城的坎特伯雷大学在他学术假期间提供的Erskine教授职位。在这个学术假期间，写作了本书的许多内容。他也要感谢他的妻子在本书和其他写作计划时对他表现出的耐心、理解和支持。Shanmugan博士还要特别感谢他的合著者William Tranter教授的友谊和他将本书全部内容整合在一起所付出的额外劳动。

Ted Rappaport想要感谢他的许多研究生，他们通过在无线通信仿真与分析方面的教学和科研活动，提供了深入理解和支持。尤其是巴西Campinas大学的Paulo Cardieri教授、高通公司的Hao Xu以及佐治亚理工学院的Gregory Durgin教授，他们几个都对本书提出了建议。特别感谢Cardieri博士他研究生阶段开展的研究工作形成了第17章的基础。

Kurt Kosbar感谢核对过本书几个早期版本的学生们和提出了宝贵意见的几位评阅人，包括Douglas Bell、Harry Nichols和David Cunningham。

William H. Tranter
K. Sam Shanmugan
Theodore S. Rappaport
Kurt L. Kosbar

目 录

译者序
前言

第一部分 概 论

第1章 仿真的作用	1
1.1 复杂性示例	2
1.1.1 易于解析处理的系统	2
1.1.2 需繁琐解析处理的系统	3
1.1.3 难以解析处理的系统	4
1.2 仿真的多学科特点	5
1.3 模型	6
1.4 确定性与随机性仿真	8
1.4.1 一个确定性仿真的实例	9
1.4.2 一个随机性仿真的实例	10
1.5 仿真的作用	11
1.5.1 链路预算与系统级标校过程	11
1.5.2 关键元件的实现与测试	12
1.5.3 完成硬件原型与验证仿真模型	13
1.5.4 生命终结预测	13
1.6 仿真软件包	13
1.7 告诫	15
1.8 MATLAB的使用	16
1.9 本书提纲	16
1.10 进一步的参考读物	16
第2章 仿真方法论	18
2.1 概述	18
2.2 方法论的各方面	19
2.2.1 将问题映射到仿真模型	19
2.2.2 单个模块的建模	24
2.2.3 随机过程建模与仿真	27
2.3 性能估计	29
2.4 小结	30
2.5 进一步的参考读物	30
2.6 习题	30

第二部分 基本概念与方法

第3章 采样与量化	33
3.1 采样	33
3.1.1 低通采样定理	33
3.1.2 低通随机信号的采样	36
3.1.3 带通采样	37
3.2 量化	39
3.3 重构与内插	43
3.3.1 理想重构	43
3.3.2 上采样与下采样	44
3.4 仿真采样频率	47
3.4.1 通用开发	48
3.4.2 数据符号的独立性	49
3.4.3 仿真采样率	51
3.5 小结	54
3.6 进一步的参考读物	54
3.7 参考文献	55
3.8 习题	55
第4章 带通信号与系统的低通仿真模型	57
4.1 带通信号的低通复包络	57
4.1.1 复包络: 时域	57
4.1.2 复包络: 频域	65
4.1.3 从 $\tilde{X}(f)$ 推导出 $X_d(f)$ 与 $X_q(f)$	66
4.1.4 能量与功率	67
4.1.5 随机带通信号的正交模型	67
4.1.6 信噪比	69
4.2 线性带通系统	71
4.2.1 线性时不变系统	72
4.2.2 从 $H(f)$ 推导出 $h_d(t)$ 和 $h_q(t)$	75
4.3 多载波信号	77
4.4 非线性与时变系统	78
4.4.1 非线性系统	79
4.4.2 时变系统	80
4.5 小结	82

4.6 进一步的参考读物	82	5.12.2 FIR_Filter_AMP_Delay.m	125
4.7 参考文献	82	5.12.3 shift_ifft.m	127
4.8 习题	83	5.12.4 log_psd.m	127
4.9 附录A: MATLAB程序QAMDEMO	86	第6章 案例研究: 锁相环与微分方程	
4.9.1 主程序	86	方法	128
4.9.2 支撑子程序	86	6.1 基本锁相环概念	128
4.10 附录B: 输入输出关系的证明	87	6.1.1 锁相环模型	129
第5章 滤波器模型与仿真方法	89	6.1.2 非线性相位模型	130
5.1 概述	89	6.1.3 具有复输入的非线性模型	132
5.2 IIR与FIR滤波器	91	6.1.4 线性模型与环传递函数	132
5.2.1 IIR 滤波器	91	6.2 一阶环与二阶环	133
5.2.2 FIR 滤波器	92	6.2.1 一阶锁相环	133
5.2.3 综合与仿真	92	6.2.2 二阶锁相环	135
5.3 IIR与FIR滤波器的实现	92	6.3 案例研究: 仿真锁相环	136
5.3.1 直接II型与转置直接II型的实现	92	6.3.1 仿真结构	136
5.3.2 FIR滤波器的实现	96	6.3.2 仿真	137
5.4 IIR滤波器: 综合方法与滤波器特性	97	6.3.3 仿真结果	139
5.4.1 冲激不变滤波器	97	6.3.4 仿真的误差源	140
5.4.2 阶跃不变滤波器	97	6.4 用仿真来求解微分方程	141
5.4.3 双线性z变换滤波器	98	6.4.1 仿真示意图	142
5.4.4 IIR数字滤波器的计算机辅助设计	104	6.4.2 再论锁相环	143
5.4.5 IIR滤波器的误差源	104	6.5 小结	146
5.5 FIR滤波器: 综合技术与滤波器特性	105	6.6 进一步的参考读物	147
5.5.1 根据幅度响应进行的设计	107	6.7 参考文献	147
5.5.2 根据冲激响应进行的设计	111	6.8 习题	147
5.5.3 FIR滤波器仿真模型的实现	114	6.9 附录A: PLL仿真程序	149
5.5.4 FIR数字滤波器的计算机辅助设计	116	6.10 附录B: PLL仿真实例的预处理	150
5.5.5 对FIR设计的评论	118	6.11 附录C: PLL后处理	151
5.6 小结	118	6.11.1 主程序	151
5.7 进一步的参考读物	120	6.11.2 支撑子程序	152
5.8 参考文献	120	6.12 附录D: 例6-3的MATLAB源代码	153
5.9 习题	120	第7章 随机信号的产生与处理	154
5.10 附录A: 升余弦脉冲例子	121	7.1 平稳与遍历性过程	155
5.10.1 主程序: c5_rcosdemo.m	121	7.2 均匀随机数发生器	157
5.10.2 函数文件c5_rcos.m	122	7.2.1 线性同余	157
5.11 附录B: 平方根升余弦脉冲例子	122	7.2.2 随机数发生器的测试	160
5.11.1 主程序: c5_sqrcdemo.m	122	7.2.3 最低标准	162
5.11.2 函数文件c5_sqrc.m	122	7.2.4 MATLAB实现	164
5.12 附录C: 例5-11的MATLAB源代码与		7.2.5 种子数与种子向量	164
数据	123	7.3 将均匀分布随机变量映射成任意pdf	164
5.12.1 c5_FIRFilterExample.m	124	7.3.1 逆变换法	165

7.3.2 直方图法	168	8.8 附录A: 例8-1的MATLAB代码	218
7.3.3 舍弃法	169	8.8.1 主程序	218
7.4 产生不相关的高斯随机变量	172	8.8.2 支撑子程序	219
7.4.1 均匀变量求和法	172	第9章 蒙特卡罗方法导论	221
7.4.2 瑞利随机变量到高斯随机变量的 映射	174	9.1 基本概念	221
7.4.3 极坐标法	176	9.1.1 相对频率	221
7.4.4 MATLAB实现	177	9.1.2 无偏和一致估计器	222
7.5 产生相关的高斯随机变量	177	9.1.3 蒙特卡罗估计	222
7.5.1 确定给定的相关系数	177	9.1.4 π 的估计	224
7.5.2 确定任意的功率谱密度或自相关 函数	178	9.2 在通信系统中的应用——AWGN信道	226
7.6 同时确定pdf和PSD	180	9.2.1 二项式分布	226
7.7 PN序列发生器	182	9.2.2 两个简单的蒙特卡罗仿真	228
7.8 信号处理	185	9.3 蒙特卡罗积分	234
7.8.1 输入-输出均值	186	9.3.1 基本概念	235
7.8.2 输入-输出互相关	186	9.3.2 收敛性	236
7.8.3 输出自相关函数	186	9.3.3 置信区间	237
7.8.4 输入-输出方差	187	9.4 小结	239
7.9 小结	187	9.5 进一步的参考读物	239
7.10 进一步的参考读物	188	9.6 参考文献	240
7.11 参考文献	188	9.7 习题	240
7.12 习题	189	第10章 通信系统的蒙特卡罗仿真	242
7.13 附录A: 例7-11的MATLAB代码	191	10.1 两个蒙特卡罗实例	242
7.13.1 主程序	191	10.2 半解析方法	251
7.13.2 支撑子程序	191	10.2.1 基本考虑	252
第8章 后处理	194	10.2.2 等效噪声源	254
8.1 基本图形方法	194	10.2.3 PSK系统误比特率的半解析估计 方法	255
8.1.1 系统实例—— $\pi/4$ DQPSK传输	194	10.2.4 QPSK系统误比特率的半解析 估计方法	256
8.1.2 波形、眼图和散点图	196	10.2.5 数据序列的选择	258
8.2 估计	199	10.3 小结	259
8.2.1 直方图	199	10.4 参考文献	260
8.2.2 功率谱密度估计	201	10.5 习题	260
8.2.3 增益、延迟和信噪比	206	10.6 附录A: 例10-1的仿真代码	260
8.3 编码	210	10.6.1 主程序	260
8.3.1 分组编码的分析方法	210	10.6.2 支撑子程序	262
8.3.2 卷积码的分析方法	213	10.7 附录B: 例10-2的仿真代码	262
8.4 小结	214	10.7.1 主程序	262
8.5 进一步的参考读物	215	10.7.2 支撑子程序	265
8.6 参考文献	215	10.7.3 <code>vxcorr.m</code>	265
8.7 习题	216	10.8 附录C: 例10-3的仿真代码	266

10.8.1 主程序	266	12.5 锁相环的例子	315
10.8.2 支撑子程序	267	12.6 小结	316
10.9 附录D: 例10-4的仿真代码	267	12.7 进一步的参考读物	316
10.9.1 主程序	267	12.8 参考文献	317
10.9.2 支撑子程序	269	12.9 习题	318
第11章 无线系统仿真的方法论	271	12.10 附录A: Saleh 模型	319
11.1 系统级简化与采样率考虑	272	12.11 附录B: 例12-2的MATLAB代码	319
11.2 整体方法论	273	12.11.1 主程序	319
11.2.1 系统模拟部分仿真的方法论	276	12.11.2 支撑子程序	320
11.2.2 系统模拟部分仿真方法论的小结	284	第13章 时变系统的建模与仿真	321
11.2.3 编码后BER的估计	284	13.1 概述	321
11.2.4 语音质量指标的估计	284	13.1.1 时变系统的实例	321
11.2.5 整体方法论小结	285	13.1.2 建模与仿真方法	322
11.3 小结	285	13.2 线性时变系统的模型	322
11.4 进一步的参考读物	285	13.2.1 线性时变系统的时域描述	323
11.5 参考文献	286	13.2.2 线性时变系统的频域描述	324
11.6 习题	286	13.2.3 线性时变系统的特性	326
		13.3 随机过程模型	330
		13.4 线性时变系统的仿真模型	332
		13.5 MATLAB例子	335
		13.5.1 MATLAB例1	335
		13.5.2 MATLAB例2	337
		13.6 小结	338
		13.7 进一步的参考读物	338
		13.8 参考文献	338
		13.9 习题	338
		13.10 附录A: 例1的MATLAB代码	339
		13.10.1 主程序	339
		13.10.2 支撑子程序	340
		13.11 附录B: 例2的MATLAB代码	340
		13.11.1 主程序	340
		13.11.2 支撑子程序	341
		13.11.3 mpsk_pulses.m	341
		第14章 波形信道的建模与仿真	343
		14.1 概述	343
		14.1.1 通信信道模型	343
		14.1.2 通信信道仿真	344
		14.1.3 离散信道模型	344
		14.1.4 通信系统性能仿真方法论	345
		14.1.5 本章提纲	345
		14.2 有线与导波信道	345
第三部分 高级建模与仿真方法			
第12章 非线性系统的建模与仿真	289		
12.1 概述	289		
12.1.1 非线性器的类型与模型	289		
12.1.2 非线性器仿真要考虑的因素	291		
12.2 无记忆非线性器的建模与仿真	291		
12.2.1 基带非线性器	292		
12.2.2 带通非线性器——带状带通模型	293		
12.2.3 低通复包络 (AM-AM和AM-PM) 模型	294		
12.2.4 复包络模型的仿真	299		
12.2.5 多载波形式	299		
12.3 有记忆非线性器的建模与仿真	304		
12.3.1 基于扫频测量的经验模型	305		
12.3.2 其他模型	306		
12.4 非线性微分方程的求解方法	308		
12.4.1 非线性微分方程的状态向量形式	308		
12.4.2 线性微分方程的递归解法——标量形式	310		
12.4.3 多步法的一般形式	313		
12.4.4 数值积分法的精度与稳定性	313		
12.4.5 求解高阶非线性微分方程——向量形式	314		

14.3 无线信道	346	15.6 两个例子	401
14.3.1 对流层信道	347	15.7 小结	405
14.3.2 降雨对无线信道的影响	347	15.8 进一步的参考读物	406
14.4 多径衰落信道	348	15.9 参考文献	406
14.4.1 概述	348	15.10 习题	407
14.4.2 多径衰落信道的例子	348	15.11 附录A: 差错向量的产生	409
14.4.3 离散与散射多径	353	15.11.1 程序: c15_errvector.m	409
14.5 多径衰落信道建模	353	15.11.2 程序: c15_hmmtest.m	409
14.6 随机过程模型	354	15.12 附录B: Baum-Welch算法	410
14.6.1 信道响应中的时变模型	356	15.13 附录C: 半隐式马尔可夫模型	412
14.6.2 重要参数	357	15.14 附录D: 游程码的产生	415
14.7 仿真方法论	358	15.15 附录E: 无差错分布的确定	415
14.7.1 散射多径衰落信道的仿真	358	15.15.1 c15_intervals1.m	416
14.7.2 离散多径衰落信道的仿真	362	15.15.2 c15_intervals2.m	416
14.7.3 离散多径衰落信道模型的例子	367	第16章 高效仿真技术	417
14.7.4 室内无线信道模型	371	16.1 尾外推法	417
14.8 小结	371	16.2 pdf估计器	419
14.9 进一步的参考读物	372	16.3 重要性采样	421
14.10 参考文献	372	16.3.1 椭圆的面积	421
14.11 习题	374	16.3.2 对pdf的敏感性	427
14.12 附录A: 例14-1的MATLAB代码	374	16.3.3 最后一笔	428
14.12.1 主程序	374	16.3.4 通信问题	429
14.12.2 支撑子程序	376	16.3.5 常规与改进的重要性采样	430
14.13 附录B: 例14-2的MATLAB代码	376	16.4 小结	431
14.13.1 主程序	376	16.5 进一步的参考读物	431
14.13.2 支撑子程序	378	16.6 参考文献	432
第15章 离散信道模型	379	16.7 习题	432
15.1 概述	379	16.8 附录A: 例16-3的MATLAB代码	433
15.2 离散无记忆信道模型	381	16.8.1 主程序	433
15.3 离散记忆信道的马尔可夫模型	382	16.8.2 支撑子程序	437
15.3.1 两状态模型	383	第17章 案例研究: 蜂窝无线通信系统的	
15.3.2 N 状态马尔可夫模型	388	仿真	438
15.3.3 一阶马尔可夫过程	388	17.1 概述	438
15.3.4 平稳性	389	17.2 蜂窝无线系统	439
15.3.5 马尔可夫模型仿真	389	17.2.1 系统级描述	439
15.4 示例HMMs-Gilbert模型和Fritchman		17.2.2 蜂窝通信系统的建模	441
模型	391	17.3 仿真方法论	448
15.5 马尔可夫模型的参数估计	393	17.3.1 仿真	448
15.5.1 比例缩放	398	17.3.2 仿真结果的处理	457
15.5.2 收敛和终止准则	399	17.4 小结	461
15.5.3 块等效马尔可夫模型	399	17.5 进一步的参考读物	461

17.6 参考文献	461	18.2.3 上行链路FDM信号的产生	481
17.7 习题	462	18.2.4 卫星转发器模型	482
17.8 附录A: 产生爱尔兰B图的程序	463	18.2.5 接收机模型与半解析BER估计器	482
17.9 附录B: 仿真代码的初始化	464	18.2.6 仿真结果	483
17.10 附录C: 同频干扰建模	465	18.2.7 小结	485
17.10.1 Wilkinson方法	466	18.3 参考文献	485
17.10.2 Schwartz与Yeh方法	467	18.4 附录A: CDMA例子的MATLAB代码	486
17.11 附录D: Wilkinson方法的MATLAB 代码	467	18.4.1 主程序	486
第18章 两个仿真实例	468	18.4.2 支撑子程序	489
18.1 码分多址系统	468	18.5 附录B: CDMA应用的预处理	490
18.1.1 系统	468	18.5.1 验证运行	490
18.1.2 仿真程序	471	18.5.2 阐明莱斯K因子影响的研究	490
18.1.3 实例仿真	473	18.6 附录C: MATLAB函数c18_ errvector.m	491
18.1.4 马尔可夫模型的开发	475	18.7 附录D: 卫星FDM例子的MATLAB 代码	492
18.2 包含非线性卫星转发器的FDM系统	478	18.7.1 主程序	492
18.2.1 系统描述和仿真目标	478	18.7.2 支撑子程序	495
18.2.2 整体仿真模型	480		

第一部分 概 论

第1章

仿真的作用

现代通信系统的复杂性促进了仿真的广泛使用。这种复杂性源自现代通信系统的结构和系统运行时所处的环境。现代通信系统要运行在功率和带宽有限的条件下，还要支持高速数据。这些要求互相矛盾，导致了复杂的调制和脉冲成形技术，以及差错控制和接收端的高级信号处理技术。在高数据率情况下，同步要求变得更严格，因而接收机也更复杂。加性高斯白噪声条件下的线性通信系统分析起来很简单，但多数现代通信系统运行在更恶劣的环境中。出于效率方面的考虑，多跳系统经常用到非线性放大器。无线蜂窝系统往往遭受严重的干扰，还有多径和阴影，使得接收端信号出现衰落。由于系统复杂，再加上环境恶劣，设计和分析问题使用传统的（不基于仿真的）方法不再是易于解析处理的了。

幸运的是，最近20年以来，数字计算机发展迅速。现代计算机不仅功能强大，而且价格便宜，适合于桌面使用，有时可以进行数小时运算而不需要人工干预。计算机的使用变得很简单，在许多工作中，计算机资源的成本无关紧要了。因此，计算机辅助设计与分析方法几乎可以供任何想用它们的人使用。功能强大面向通信系统的软件包的开发，更加速了仿真方法在通信领域的应用。因而，随着系统复杂度的增加，计算能力也在提高。在许多情况下，可获得合适的计算能力，这直接导致了許多复杂的信号处理结构。而这些信号处理结构，现在已经是现代通信系统的基本构成模块。因此，并不只是运气好，在需要计算工具时它们就问世了，而是实用的计算能力（表现为微处理器的形式），作为保障技术，使现代通信系统变得可能，也使强大的仿真引擎才有实现的可能。

随着计算机方法的发展，我们大致地称作仿真实验的领域也得到了迅速发展。因此，和几十年前相比，现在更容易获得所需的仿真工具和方法，以成功用于解决设计和分析问题，对其理解也更透彻。现有大量的技术论文和一些书籍，阐述如何使用这些工具解决通信系统的设计和分析。

使用仿真的一个重要动机在于，仿真是深入理解系统特性的有价值的工具。一个开发得好的仿真跟在实验室实现一个系统很类似，可以很方便地对要研究的系统进行多点测量，也可很容易作参数研究，因为可以任意改动滤波器带宽和信噪比（SNR）等参数，而且还能很快地观测到这些改变对系统性能的影响。可以很容易产生时域波形、信号谱图、眼图、信号星座图、直方图和许多其他图形显示。在有需要的时候，还可以将这些图形跟系统硬件产生

的等效显示作比较。在本书中会看到，将仿真结果和系统硬件产生的结果对比是设计过程的重要部分。可能更重要的是，比起实际系统硬件，仿真能更容易也更经济地对各种假设情况进行研究。尽管我们经常采用仿真来获得误比特率（BER）之类变量的数值，但是，正如R. W. 汉明所言，仿真的主要作用不在于获得数值而在于获得深入的理解。

1.1 复杂性示例

随通信系统的不同，其复杂程度也很不同。我们下面考虑复杂程度依次增加的三个通信系统。不难看出，对第一个系统完全没必要进行仿真。对第二个系统，仿真也不是必需的，但可能是有用的。而要对第三个系统作详细的性能研究，就必须进行仿真。这里考虑的三个系统，就算是最复杂的那个，以现在的标准来衡量仍是很简单的。

1.1.1 易于解析处理的系统

图1-1所示为一个非常简单的通信系统。这个系统会使我们想起，在上通信原理入门课时学过的基本通信系统。数据源产生一个符号序列 d_k 。假设这些符号为离散的，并假设源符号集是一个有限符号库的元素集。对二进制通信系统，源符号集

(Alphabet)由两个符号构成，通常记为 $\{0, 1\}$ 。此外，还假设数据源是无记忆的，即数据源产生的第 k 个符号独立于它产生的所有其他符号。满足这些条件的数据源叫做离散无记忆源(Discrete Memoryless Source, DMS)。调制器的作用是将源符号变换成波形，其中每个不同波形代表一个不同的源符号。对二进制系统，调制器可以产生两种可能的波形。这一波形集合可记为 $\{s_1(t), s_2(t)\}$ 。在这种情况下，简单地假设发射机对调制器的输出进行放大，使得调制器产生的信号能以期望的比特能量发射出去。

系统的下一个部分是信道。通常，信道是系统中需要进行精确建模的最复杂的部分。不过，这里简单地假设信道只是对发送的信号叠加一个噪声。假设这个噪声在所有的频率上具有恒定的功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)，满足这一恒定PSD特性的噪声叫白噪声，另外假设噪声幅度具有高斯概率密度函数。噪声为加性高斯白噪声的信道叫加性高斯白噪声(AWGN)信道。

接收机的功能是观察接收机输入端信号，并据此产生一个对原始数据信号 d_k 的估计，记作 \hat{d}_k 。图1-1所示的接收机是最佳接收机，因为我们对数据符号所作的估计使得差错概率 P_E 最小。从基本数字通信原理中可知，上一段描述的系统（在AWGN环境下发送二进制信号的系统）的最佳接收机包含一个匹配滤波器（或等价于相关接收机）。匹配滤波器在一个符号周期内对信号进行观察。在符号周期末，对匹配滤波器的输出采样，产生一个统计量 V_k 。因为在信道中对发送的信号叠加了噪声，这个统计量是随机变量。将 V_k 与阈值 T 作比较，如果 $V_k > T$ ，作出的判决 \hat{d}_k 倾向于其中一个数据符号；如果 $V_k < T$ ，作出的判决 \hat{d}_k 则倾向于另一个数据符号。

我们称这个系统为易于解析处理的，因为利用基本通信原理知识，能很容易地对系统进行分析。例如，可以推导出差错概率为

$$P_E = Q\left(\sqrt{k \frac{E_s}{N_0}}\right) \quad (1-1)$$

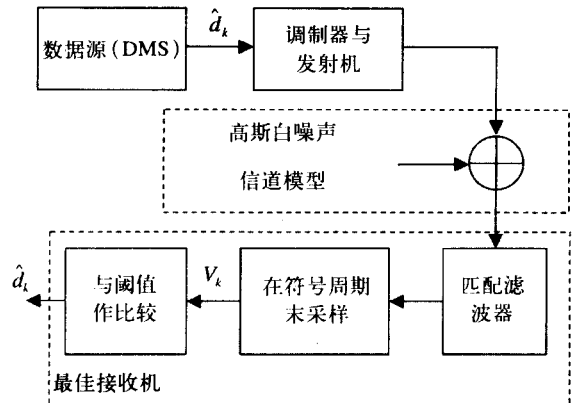


图1-1 易于解析处理的通信系统

这里, E_s 表示一个符号周期内的平均能量, 跟波形集合 $\{s_1(t), s_2(t)\}$ 相关联, N_0 为加性信道噪声的单边功率谱密度, 参数 k 取决于波形 $\{s_1(t), s_2(t)\}$ 的相关程度。比方说, 对FSK (frequency-shift keying, 频移键控) 发送方式, $\{s_1(t), s_2(t)\}$ 为具有不同频率和相同功率的正弦波形, 假设频率选取正确, 信号是不相干的, 有 $k=1$ 。对PSK (phase-shift keying, 相移键控) 方式, 发送数据的信号是具有相同频率和功率但不同初始相位的正弦波。如果相差为 π 弧度, 使得 $s_2(t)=-s_1(t)$, 则信号为逆相关, 且有 $k=2$ 。

图1-1所示系统的性能, 通过传统的分析方法很容易确定, 因而将该系统归入易于解析处理的这一类。为什么该系统是易于解析处理的? 首先也是最明显的原因在于信道是AWGN信道, 并且接收机是线性的。因为噪声是高斯噪声, 而匹配滤波器是线性系统, 判决统计量 V_k 作为高斯随机变量。因而通过分析, 我们可以计算出作为接收端滤波器参数函数的误比特率 (BER), 并可求出对应于最小BER的滤波器参数值。

图1-1所示系统是易于解析处理的还因为其他一些因素。这些因素跟系统模型的简单性有关, 而简单性又源于所作的几个假设。假设数据源为无记忆的, 虽然在实际系统中情况未必如此。此外, 还假设理想的符号同步, 从而可以精确知道数据符号的起始和终止时间。同步方面的假设保证了能正确获取判决统计量。

仿真易于解析处理的系统是否也有作用呢? 答案是肯定的, 因为图1-1所示的系统很可能是一个更复杂的系统的基本构成模块。对易于解析处理的系统, 可以开发出仿真代码, 因为这种系统能直接进行分析, 开发出的仿真能很容易得到验证。接下来, 还可以根据待研究系统的建模需求, 对数据源、调制器、信道或接收机进行修改。此外, 在有需要时还可以把其他子系统添加到仿真模型中去。在继续对所研究的系统建立仿真模型时, 就有把握知道起点是正确无误的。

1.1.2 需繁琐解析处理的系统

下面我们将注意力转移到稍微复杂一点的系统上。如图1-2所示系统跟我们前面研究过的系统唯一的区别是, 在发射机中加入了非线性大功率放大器 (High-Power Amplifier, HPA) 和滤波器。先考虑非线性放大器。和线性放大器相比, 非线性放大器表现出高得多的功率效率, 因而经常优先应用于功率受限的场合。这方面的实例包括太空应用和蜂窝移动系统, 因为这些系统必须节省电池。和保持输入信号频谱的线性放大器不同, 非线性放大器会产生谐波与交调失真。因而, 放大器输出频谱拓展的带宽比调制器输出频谱所占据的带宽要大得多。紧接在放大器之后的滤波器多数情况下是带通滤波器, 其中心频率等于所期望的载波频率。这个滤波器的作用就是减少非线性带来的谐波与互调失真。

调制器与HPA后面的滤波器导致数据信号时间扩散 (Time Dispersion), 从而在时间上滤波后的信号不再局限在符号周期内, 这将引起符号间干扰 (Intersymbol Interference, ISI)。由于符号间干扰, 要进行判决的第 i 个符

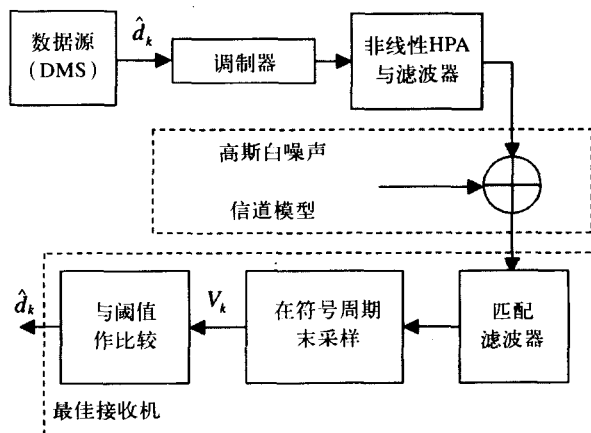


图1-2 需繁琐解析处理的系统