

The MATLAB logo is prominently displayed at the top. It features a large, bold, black letter 'M' on the left. To its right, the word 'ATLAB' is written in white, bold, sans-serif capital letters, set against a red rectangular background with horizontal lines. The entire logo is positioned above a green circular area that resembles a CD or DVD, which has a black ring and a bright orange center. The background of the cover is a light gray with a pattern of overlapping, angular shapes in shades of gray and green.

MATLAB

MATLAB 仿真 在通信与电子工程 中的应用 (第二版)

徐明远 邵玉斌 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

MATLAB 仿真

在通信与电子工程中的应用

(第 二 版)

徐明远 邵玉斌 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书简要、系统地介绍了应用 MATLAB 进行仿真的原理和方法。通过大量的仿真实例使读者在掌握建模、仿真方法的同时,加深对通信系统、电子工程、信号处理原理的理解,较快地建立自己的仿真环境和试验平台。

全书共 10 章。第 1、2 章介绍了仿真的意义、MATLAB 仿真的原理以及三种主要的仿真试验方法;第 3 章至第 6 章介绍了 MATLAB 仿真的测量仪器,仿真在电子工程、通信工程、信号处理中的应用,较全面地覆盖了“通信原理”、“数字信号处理”等课程的基本内容;第 7 章至第 10 章以专题讨论的方式介绍了应用仿真方法研究现代通信技术中的差错控制、扩频通信、智能天线以及声音信号处理的实例。书中的实例均经过验证,大部分是用 Simulink 建模和仿真的。

本书既可作为高等学校电子信息类本科高年级学生和研究生的教材或参考书,也可作为从事科学研究的工程技术人员学习通信与电子系统建模和仿真的参考资料。

★本书配有电子教案,需要者可登录出版社网站,免费下载。

图书在版编目(CIP)数据

MATLAB 仿真在通信与电子工程中的应用/徐明远,邵玉斌编著. —2 版

—西安:西安电子科技大学出版社,2010.5

ISBN 978-7-5606-2413-6

I. M… II. ①徐… ②邵… III. ①通信系统-系统仿真-软件包, MATLAB
②电子系统-系统仿真-软件包, MATLAB IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 039059 号

策 划 臧延新

责任编辑 雷鸿俊 臧延新

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2010 年 5 月第 2 版 2010 年 5 月第 5 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 24

字 数 566 千字

印 数 12 001~15 000 册

定 价 45.00 元(含光盘)

ISBN 978-7-5606-2413-6/TN·0559

XDUP 2705002-5

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

时光如梭，转眼本书第一版面世已五年，承蒙读者厚爱，已重印多次，在电子通信系统仿真领域有一定影响。随着 MATLAB 仿真软件的改进，国内读者多数已经开始使用更新版本，应读者要求，本书代码和模型有必要进行更新。此外，本书第一版没有附程序和模型实例的电子文件，给读者使用造成了不便。有许多读者要求提供新版本的程序、模型实例电子文件，以便更好地验证和应用。

本次再版主要作了以下修订：

1. 以新的 MATLAB 2008b 版本为仿真工具，重新对原书程序和 Simulink 模型进行了整理。书中程序和模型全部在新的 MATLAB 2008b 环境下调试通过。全书文字、模型图、表等全部针对新版 MATLAB 进行了重写和更新。

2. 修正了第一版中的错漏之处，替换了因 MATLAB 版本更新而不再适用的模块和函数。

3. 书后附有全书模型和源代码文件名索引，供读者查询应用。（参见附录 B）

4. 给出了在新版本 MATLAB 2008b 中使用汉字的配置方法。（参见附录 C）

在本次修订过程中，徐明远提供了全书程序和模型实例的电子文件，邵玉斌对模型文件进行了验证和修改，并对原书文字、图表进行了修改和补充。

感谢西安电子科技大学出版社相关人员为本书第二版的出版所付出的辛劳。

本书所附光盘提供了全部 MATLAB/Simulink 2008b 版本的模型和程序。作者的联系方式是：xumy1@163.com, shaoyubin999@sina.com。

作 者
2010 年 1 月

第一版前言

系统建模和仿真技术已经日益成为现代理工科各专业进行科学探索、系统可行性研究和工程设计不可缺少的重要环节。在通信与电子工程领域,系统仿真技术一直是进行新型通信协议研发、通信体制的性能研究、通信系统设计、算法分析和改进、通信信号处理、电子系统设计的重要手段。传统的仿真技术基于C语言等计算机专业编程工具,编程的工作量极大,仿真程序的可读性、可重用性、可靠性都很难适应大型复杂通信系统仿真的需要。通信与电子工程师和科研工作者迫切需要一种仿真工具,以摆脱繁杂的编程工作,将精力和时间集中到解决科学问题、提出和验证创新思想和算法上来。MATLAB以及Simulink科学计算、建模和仿真软件正是为了适应这一要求而产生的优秀仿真平台软件,并已成为全世界科学工作者共同的学术交流工具以及系统仿真界事实上的工业标准。现在,我国教育科研部门对MATLAB的地位和重要作用也逐渐达成了共识,尤其是在硬件设施有限、科研经费不足的情况下,MATLAB的广泛应用必将大大提升我国科教事业的基础研究水平。

本书主要介绍应用MATLAB/Simulink软件对通信电子系统进行建模和仿真试验的研究方法,在内容上不追求对MATLAB软件的完整和系统描述,而是针对教学、科研开发的实际,选择通信与电子工程实践中最基本、同时也是最重要的内容作为仿真试验的研究对象。同时,还结合数字通信系统的基本技术介绍了MATLAB/Simulink软件在仿真试验建模中的应用。本书中丰富的实例与“通信原理”、“通信系统”、“数字信号处理”、“编码原理”、“扩频通信”等课程内容有着较好的衔接。这些实例可以作为习题以及课堂演示、课程设计的题材与内容,较大、较深入的系统仿真题目可作为本科课程设计、毕业设计的入门专题。本书专题部分的内容主要来自于作者多年在通信领域的工程实践体会、科研成果和学术论文,同时也把MATLAB软件中有代表性的仿真系统作为学习和研讨的对象。为深入研究信息工程的相关内容,书中介绍了切入的方法,并提供了仿真的模型和平台,希望对通信领域的科研工作者起到抛砖引玉的作用。

本书提供了大量可以运行的、几乎涉及通信与电子工程各个方面的仿真实例。特别是应用Simulink工具结合MATLAB混合编程建立的仿真系统模型,已经不再是MATLAB仿真工具的初级应用,而是该仿真工具在通信工程实践中真实应用的展现,有很高的工程参考价值,可以为在通信工程领域中进行系统设计和测试的科技工作者提供具有实用价值的系统仿真模型。在介绍每一个仿真模型时,主要论述了建模仿真的如下几个方面:

(1) 简要介绍仿真系统的功能,完成的任务,建模的主要思想。

(2) M文件编程的实例给出了源程序、Simulink仿真的实例和仿真系统的系统框图。本书提供的仿真实例和程序,可以在MATLAB 6.5.1版本下运行。个别程序在个别地方改动后,全部程序都可以在MATLAB 7.0版本下运行。

(3) 对有些出现频度较高或者较为重要的模块,给出了参数设置对话框。为节约篇幅,仅少数的仿真模块显示了参数设置对话框。

(4) 给出了仿真系统中模块的主要参数设置值。应用表格的形式,给出了仿真模块的地址,便于读者查找。

(5) 重点介绍了参数设置的注意事项,以及对仿真结果的影响。

这样,读者可以用较少的时间,建立起一个可以运行的仿真系统。

在对所建立的仿真系统有了较多认识的基础上,可以进一步按照读者的需要,对系统进行各种改造,或者将若干成功建立的系统组合成较为复杂的、大一些的系统。在建立并应用该仿真系统作为研究某一问题的平台的运行过程中,将会加深对该问题的理解,提高和熟悉 MATLAB 建模仿真的技能。作者有这样的体会:应用上述方法对数字通信原理的相关问题进行了较为深入的仿真试验研究后,再次阅读数字通信原理相关书籍时,考虑的已经不只是局限于对某些问题难度上的理解,而是这些理论原理在工程实践中活生生的展示。

本书对仿真技术在通信领域中的应用做了比较全面的论述,因此它是学习系统仿真技术的一本好书。同时,它还可以作为一本 Simulink 的使用指导书或手册。仿真建模、仿真结果的表达离不开必要的数学知识及相应的方法。为此,描述问题时我们首先应建立物理概念,介绍必要的数学公式与数学建模思想,然后论述建立仿真模型的方法要点,并对仿真系统的运行结果进行简要的点评和讨论。书中介绍了必需的相关知识和应用 MATLAB 软件工具求解数学问题以及表达试验研究成果的方法。随着通信技术的发展,电子设备,甚至家用电器都大量采用了数字信号处理芯片。信号处理的知识成了进一步学习通信技术、电子技术的必备工具。因此,本书还介绍了基本的信号处理的相关知识,特别是应用 MATLAB 软件工具进行信号处理的方法。

本书既可作为通信工程、电子工程专业本科高年级学生和研究生建模和仿真课程的教材或参考书,也可作为从事该领域研究开发的工程技术科技人员的参考资料。本书的内容取自作者多年为本科生、研究生讲授的“通信仿真”课程的教案、课程设计,指导的本科生的毕业设计、硕士研究生的学位论文,以及科研的成果和心得。大部分程序由作者编制,少部分由 MATLAB 软件中的 DEMO 例子加以修改和扩充而成。第 3、4、5、7、8、9、10 章由徐明远编写,第 2、6 章和附录由邵玉斌编写,第 1 章由徐明远、邵玉斌共同编写。

本书的出版得到了林华芳教授的鼎力帮助,并得到了吕扬教授、龙华副教授、刘增力副教授的关心和支持,研究生邱恭安、李金锁、杨波、和丽芳、王庆平、刘卫洪、张中辉、罗轶也做了许多工作,在此表示诚挚的感谢。

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,还望国内学术同仁批评指教。

作 者

2004 年 11 月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 仿真的意义	1
1.1.1 数理基础与专业知识的学习	1
1.1.2 科学研究、产品研发与仿真试验	1
1.2 电子通信系统的建模与仿真	2
1.2.1 通信与电子系统仿真的概念	2
1.2.2 计算机仿真的步骤	3
1.2.3 电子通信系统计算机仿真的优点和局限性	5
1.3 本书的内容结构	6
第 2 章 MATLAB 仿真	8
2.1 MATLAB 介绍	8
2.1.1 MATLAB 的特点	8
2.1.2 MATLAB 快速入门	9
2.1.3 MATLAB 程序设计	13
2.2 MATLAB 编程仿真	18
2.2.1 时间连续信号与系统的计算机仿真问题	18
2.2.2 基于数据流的仿真方法	29
2.3 Simulink 仿真	29
2.3.1 Simulink 仿真入门	29
2.3.2 Simulink 仿真原理	43
2.3.3 基于时间流的仿真方法	54
第 3 章 MATLAB 的仿真测量仪器	55
3.1 概述	55
3.2 电压测量	55
3.2.1 指针式电压表	55
3.2.2 数字式电压表	57
3.3 时间域的测量仪器	59
3.3.1 示波器	59
3.3.2 X-Y 记录仪	63
3.3.3 逻辑分析仪	64
3.3.4 相位仪	68
3.4 频率域的测量仪器	70
3.4.1 1 GHz 信号的频谱	70
3.4.2 m 序列的频谱	73
3.4.3 FM 频率调制信号带宽试验	77
3.4.4 数字式频率计	79
3.5 其他显示仪器	81

3.5.1 眼图	81
3.5.2 星座图	85
3.5.3 离散时间轨迹图	88
3.5.4 矩阵显示图	89
3.5.5 瀑布显示图	90
3.6 误码仪	93
第4章 电子线路仿真试验	96
4.1 信号合并	96
4.2 微积分	98
4.3 触发器	100
4.4 分频器	102
4.5 使能开关	104
4.6 编程开关	106
4.7 移位寄存器	109
4.8 整流电路	111
4.9 驻波演示	114
4.10 超外差式接收机	115
第5章 数字通信系统的仿真	120
5.1 概述	120
5.2 信源	121
5.2.1 锯齿波信号	121
5.2.2 方波信号	122
5.2.3 脉冲信号	123
5.2.4 扫频信号	124
5.2.5 压控振荡器	125
5.3 信源编码	127
5.3.1 采样及采样定律	127
5.3.2 量化及编码	130
5.3.3 非均匀量化及编码	132
5.3.4 增量调制	135
5.4 模拟调制技术	137
5.4.1 AM 幅度调制	137
5.4.2 FM、PM 角度调制	142
5.5 数字调制技术	147
5.5.1 ASK 幅度键控	147
5.5.2 基带移频键控	149
5.5.3 基带移相键控	153
5.5.4 频带移频键控与移相键控	158
5.6 多元调制仿真	160
5.7 差错控制	169
5.7.1 线性码	169
5.7.2 循环码	172
5.7.3 卷积码	173

5.7.4	李德-索罗蒙(RS)码	178
5.7.5	BCH 码	183
5.7.6	汉明码	186
5.8	交织与置乱	187
5.8.1	交织	187
5.8.2	置乱	203
5.9	频率合成	204
5.9.1	锁相环频率合成	205
5.9.2	分数锁相环频率合成	207
5.10	多址技术	208
5.10.1	频分多址(FDMA)	208
5.10.2	时分多址(TDMA)	211
5.10.3	码分多址(CDMA)	215
5.11	信道仿真	218
5.11.1	加性高斯白噪声信道	219
5.11.2	瑞利信道	221
5.11.3	莱斯信道	223
5.11.4	有突发干扰的信道	223
5.11.5	二进制平衡信道	224
第 6 章	信号处理	225
6.1	MATLAB 的数据可视化表达	225
6.1.1	二维图形的绘制	225
6.1.2	三维图形的绘制	236
6.1.3	子图的绘制	239
6.1.4	创建图形窗口	240
6.1.5	图像表现	241
6.1.6	动画	242
6.2	MATLAB 仿真中的信号处理	243
6.2.1	数据采集	243
6.2.2	确定信号的产生	245
6.2.3	随机信号的产生	248
6.3	信号特征参数的计算	250
6.3.1	离散信号的能量和功率计算方法	250
6.3.2	离散信号的直流分量和交流分量	251
6.3.3	离散信号的统计特征参数的计算	252
6.4	信号的频谱分析	253
6.4.1	频谱分析的原理	253
6.4.2	频谱分析的若干问题	257
6.4.3	谱估计	261
6.4.4	时频分析	266
6.4.5	离散余弦变换(DCT)	267
6.4.6	希尔伯特(Hilbert)变换	270
6.5	线性系统	271

6.5.1	连续时间线性系统的表示	271
6.5.2	离散时间线性系统的表示	272
6.5.3	模型的相互转换	272
6.5.4	线性系统的特性表达	273
6.5.5	通信系统的特性表达	274
6.6	数字滤波器设计与实现	277
6.6.1	数字滤波器的设计参数	277
6.6.2	巴特沃斯滤波器设计	278
6.6.3	其他类型滤波器的设计	282
6.6.4	滤波器的实现	284
第7章	通信系统差错控制仿真试验	288
7.1	缩短卷积码	288
7.1.1	缩短卷积码的基本原理	288
7.1.2	仿真系统介绍	289
7.2	有缩短卷积码加交织的差错控制系统研究	293
7.2.1	概述	293
7.2.2	仿真模型的建立	293
7.3	自适应均衡系统(LMS算法)	299
7.3.1	概述	299
7.3.2	仿真试验的思路与内容	300
7.4	迭代译码的级联卷积码	302
7.4.1	迭代译码的级联卷积码的基本原理	302
7.4.2	仿真实验内容	304
第8章	扩频通信的仿真试验	308
8.1	扩频码相关性的讨论	308
8.1.1	常用的伪随机序列	308
8.1.2	常用伪随机序列的相关性讨论	316
8.2	扩频通信原理	318
8.3	扩频通信系统	321
8.3.1	先扩频后调制	321
8.3.2	先调制后扩频	324
8.4	跳频通信系统	327
第9章	天线及智能天线仿真试验	331
9.1	全向天线的波束下倾	331
9.1.1	全向天线的波束下倾的基本原理	331
9.1.2	仿真实现	331
9.2	天线阵的波达方向估计	332
9.2.1	原理	333
9.2.2	求波达方向估计的方法	334
9.3	天线阵的波束形成	337
第10章	声学仿真试验	341
10.1	回声试验	341

10.1.1	回声的基本原理	341
10.1.2	回声的仿真试验	341
10.2	多普勒效应	343
10.2.1	多普勒效应的基本原理	343
10.2.2	多普勒效应的仿真试验	343
10.3	声学信号的滤波特性试验	345
10.3.1	声音滤波的应用	345
10.3.2	声音滤波的仿真试验	346
10.4	交混回响	348
10.4.1	交混回响的应用	348
10.4.2	交混回响的仿真试验	348
10.5	短时傅立叶变换	349
10.5.1	短时傅立叶变换的基本原理	349
10.5.2	短时傅立叶变换的仿真试验	349
10.5.3	仿真试验结果的表达	350
附录 A MATLAB 数字计算基础		352
A.1	通信工程中常用的特殊数学函数	352
A.1.1	伽玛函数	352
A.1.2	贝塞尔函数	352
A.1.3	误差函数、误差互补函数和 Q 函数	353
A.2	多项式运算	354
A.2.1	多项式的表达方式	354
A.2.2	多项式的因式分解——多项式方程求根	354
A.2.3	多项式的乘积展开	354
A.2.4	多项式相乘	355
A.2.5	多项式的除法	355
A.3	数组运算	355
A.3.1	数组的加法和减法运算	356
A.3.2	数组的乘法、除法和乘方运算	356
A.3.3	数组的关系和逻辑运算	356
A.4	矩阵运算	356
A.4.1	矩阵生成	356
A.4.2	矩阵运算	357
A.5	微分与积分	359
A.5.1	函数的数值差分 and 微分运算	359
A.5.2	函数的数值积分运算	360
A.6	极值和方程求解	361
A.6.1	函数的极值问题求解	361
A.6.2	代数方程求解	362
附录 B 本书程序代码索引		365
附录 C MATLAB 2008b 版本中使用汉字的配置方法		370
参考文献		371

第1章 概 述

1.1 仿真的意义

1.1.1 数理基础与专业知识的学习

在通常的学习过程中,数理知识和专业知识的学习与实践是靠课堂讲授和数量不多的作业以及十分有限的实验来完成二者的结合的。所学抽象的理论、复杂的计算,由于实践机会不多,而且间隔周期又长,难以较快地掌握。当结合仿真实验学习时,在掌握了原理与方法的基础上,对于复杂计算的题目,其计算将通过计算机来完成,可以迅速得出结果,而且还可以很快作出相应的图表曲线,其物理本质与规律性将一览无遗。并且可以方便、频繁地应用先进的软件工具与方法对基本原理、计算方法、先进技术、复杂的系统进行反复的实验研究。过去很长时间才算出的结果,现在使用几条指令,不但有了结果,而且连曲线都画出来了,提高了学习相关知识的效率,反过来又加深了对数理知识和专业知识理解。参与者的创造性、想象力也可以在仿真平台上尽情地发挥与展现。每个仿真模型建立的过程,从构思、建设到调试通过,直至最后得出结果,都是一次对专业知识、数理基础和计算机知识的复习、巩固、完善与提高。因此采用仿真试验的方法,既加深了对数理基础、专业知识的理解,又提高了学习的效率。

1.1.2 科学研究、产品研发与仿真试验

信息科学发展迅速,用于研发、测试的仪器更新速度加快,随着技术含量的提高,价格也越来越昂贵。并不是所有从事研究与开发的工程技术人员都能够拥有与科学技术发展进程相应的仪器设备。计算机仿真可以用于大部分电子工程、现代通信技术和通信系统的实验研究工作。采用计算机仿真的方法可以在一定程度上克服没有仪器设备所带来的问题。在计算机及相应软件的配合下,通过专门培训就可以做出相应的计算机仿真试验。

传统的研究开发工作是从购买元件,做印制电路板,搭建电路,配置相应的仪器做试验开始的。这样的方法在大多数场合已显得很落后。新一代通信产品,甚至家用电器,都已经进入了采用DSP、PLD和FPGA芯片的时代。以前要一大堆器件才能够实现的功能,现在通过对上述芯片的开发,最后用芯片制成的功能强大的、批量生产的、廉价的集成电路就可实现。设备的功能变强了,体积小了,可靠性提高了,价格降低了。现代通信设备及通信系统的设计步骤是:需求分析、方案设计、建模、仿真试验、制作芯片、设备制造和系统集成。对建模、仿真技术的掌握,在研究、开发领域将大有作为。谁开发了芯片,谁就拥

有了自主的知识产权。

建模、仿真能力对年轻一代通信技术人才已经不是特长，而是基本的技能和交流工具。ITU(国际电信联盟)第三代通信系统的标准讨论规定：技术文本与仿真结果必须同时提交，并且鼓励对其他公司提交的方案进行仿真验证。我们学习掌握 MATLAB 软件工具，在某种意义上说是在科学计算、工程设计和工具应用上与国际接轨。

1.2 电子通信系统的建模与仿真

1.2.1 通信与电子系统仿真的概念

系统仿真(Simulation)技术也称为系统模拟技术，本书中特指 20 世纪 70 年代发展起来的利用现代计算机和仿真软件来进行仿真的计算机仿真技术。由于计算机仿真具有精度高、通用性强、重复性好、建模迅速以及成本低廉等许多优点，尤其是近年来发展了以 MATLAB/Simulink 为代表的多种科学计算和系统仿真语言，使用起来比利用传统的 C/C++ 语言进行仿真方便快捷得多。系统仿真技术在国内学术界和科技界的迅速普及，也大大提高了科学研究的效率。本书是以 MATLAB/Simulink 为仿真语言来进行系统仿真试验的。(假定读者已经具有 MATLAB/Simulink 的知识和数值计算的基础知识，并对信号与系统、数字信号处理、通信原理等有所了解。)

所谓电子通信系统的计算机仿真，就是利用计算机对实际电子通信系统的物理模型或数学模型进行试验，通过这样的模型试验来对一个实际系统的性能和工作状态进行分析和研究。当在实际电子通信系统中进行试验研究比较困难或者根本无法实现时，仿真技术就成为必然的选择。例如，要测试某种调制方式在时变多径无线电信道中的性能表现，通常只能通过建立时变多径无线电信道的数学模型，利用计算机来实现仿真的无线电信道，通过数值计算以及蒙特卡罗方法进行仿真研究。又如，在对新一代通信体制进行性能分析和系统设计时，实际系统根本不存在，因此也必须采用仿真手段。

电子通信系统是以电信号作为主要的信息载体，以信息传输和处理为目的的一类工程系统，是由一系列称为实体的系统元素相互关联而组成的具有一定功能的集合体。对电子通信系统的研究一般是通过建立系统模型来进行的。系统模型是对系统的某一方面的特定性能的一种抽象形式。例如，在对小信号放大器的研究中，针对直流分析可建立其直流等效电路模型，而针对交流分析时又要使用其交流等效电路模型。通过对模型的分析 and 研究，就能够认识原型系统某一方面的物理本质。对模型的分析 and 研究通常采用解析计算和数值计算两种方法，解析计算也就是所谓的理论分析方法，而数值计算则是计算机仿真分析方法之一。解析计算和数值计算可以相互印证，对于较为复杂的系统，特别是当这样的系统处于某种随机因素影响的环境中时，解析计算通常是不可能的，即便可能也只是近似的，在这种情况下数值计算就显示出了其特有的优势。因此，建模是系统仿真的基础。系统的相似性原理指出，对于自然界中的任何一种系统，通常会存在另一个系统，两者在某种意义上可以进行相似的数学的或物理的描述。例如，力学中的单摆系统与电学中的 LC 振荡电路具有相似的数学方程描述。所以，在某种意义上，系统可以用物理模型或数学模

型来近似。

本书中,电子通信系统的物理模型特指利用电源、电阻、电容、电感和晶体管等电子器件所搭建的电子线路。通过物理模型可以进一步抽象出其数学模型。计算机仿真的本质是对系统数学模型的数值计算。

系统的数学模型是通过抽象的数学方程来描述系统内部物理变量之间的关系,从而建立的模型。对系统数学模型进行研究(解析的或数值的)就可以揭示系统内在的随时间变化的性质。按照系统的数学模型性质,可划分为有记忆系统和无记忆系统两大类。无记忆系统又称为静态系统,其数学描述的一般形式是代数方程、逻辑表达式等。有记忆系统又称为动态系统,其数学描述的一般形式是微分方程、差分方程和排队论方程等。特别是在现代系统分析理论中,常常将微分方程或差分方程采用其等效形式——传递函数和状态方程来描述。状态方程的数值求解是 Simulink 系统仿真工作的基础。采用微分方程形式描述的系统称为连续系统。采用差分方程形式描述的系统称为时间离散系统。如果系统需要联合采用微分方程和差分方程来描述,则称为(连续和离散)混合系统。

本质上,只要能够构造出系统的数学模型, MATLAB/Simulink 就可以对任意系统进行仿真分析。但是在实际应用中,就方便性而言, MATLAB/Simulink 特别适合于针对电子通信系统模块的系统级仿真,而对于电子通信系统的电路级仿真则显得不太方便,即 MATLAB/Simulink 的当前版本(2008b)还不能够将物理模型即电路自动转换为数学模型来进行分析。对电子电路进行仿真的首选软件仍然是 Pspice。因此,本书中主要讨论电子通信系统的系统级(方框图级)的仿真问题。

1.2.2 计算机仿真的步骤

计算机仿真的一般步骤有以下几个方面。

1. 仿真问题的提出

系统设计之前,应该有一个完整、准确的系统需求说明。建立系统仿真的第一步必须清楚、准确地提出仿真试验需要解决的问题。

2. 仿真系统分析

对所提出的仿真系统给出详细定义,明确系统中的模块、系统构成、模块之间的相互关系,系统的输入/输出、边界条件以及系统的约束条件,并确定仿真所要达到的目标。

3. 建立系统的数学模型

根据仿真系统分析的结果,确定系统中的参数、变量及其相互之间的关系,并以数学形式将这些关系描述出来,从而构成仿真系统的数学模型。数学建模是系统仿真中最关键的一步,所建立的数学模型必须尽可能准确地反映所关心的真实系统的特性,而又不能过于复杂,以免降低模型的效率,增加不必要的计算过程,即建模需要根据求解问题的要求,在模型的近似程度与复杂程度之间折中。电子与通信系统的数学模型通常以方框图形式或数学方程形式来表达。

4. 数据收集

根据建立的数学模型所需要的数据元素,收集与模型系统有关的数据。例如,对一个放大器建模之后,就需要取得其中的晶体管等各元器件的型号(物理参数)。

5. 根据数学模型建立系统的计算机仿真模型

系统的计算机仿真模型指数学模型的计算机实现。确定计算机仿真模型就是根据数学模型和收集的数据,确定其中各子模块的结构、输入/输出接口、输入/输出的数据表达形式、数据的存储方式等。然后编制相应的程序流程,最后选择某种程序设计语言编程实现。

MATLAB/Simulink 属于一种通用的科学计算和系统仿真语言。在 MATLAB/Simulink 下,从数学模型到计算机仿真模型的转换非常容易。MATLAB/Simulink 提供了以下三种方法。

(1) M 文件编程实现的方法:根据数学模型所建立的方程和数据参数,通过编程实现方程的表示和数值求解。其特点是灵活性好,数学关系显式地表达在程序语句之中,但是仿真的直观性方面稍显欠缺,通常在仿真计算完毕之后才能看到结果。M 文件编程实现的方法是基于数据流的仿真方法。

(2) Simulink 方法:可以根据数学模型建立对应的系统方框图,通过所见即所得的方式连接模块,然后选择求解方式和精度,运行仿真。其特点是直观性好,可以在仿真过程中“实时地”修改系统模块的参数,并能够实时地显示当前的仿真结果。Simulink 仿真实现的方法是基于时间流的仿真方法。

(3) Simulink 结合 M 文件编程的方法:这是前两种方法的综合应用,同时具备图形界面的直观性和字符界面的强大功能。事实上,所有 Simulink 的模块以及系统构建、仿真参数、仿真求解算法等均可通过编程语句实现。与通过图形界面交互完成的仿真过程相比,通过编程语句实现将“手动”的仿真过程真正变成了“自动化”仿真过程。实际中,对于较为复杂的系统,如整个通信接收机的仿真,往往采取 Simulink 结合 M 文件编程的方法。

6. 仿真模型验证

仿真模型验证的目的是确定计算机仿真模型是否准确表达了数学模型。由于计算机仿真模型是由程序实现的数学模型,因此编制程序的错误或求解问题方法选择不当均会导致仿真结果偏离真实值。在利用 C 语言等编制仿真程序时,程序调试、数值算法调试等都是件不容易的事情。MATLAB/Simulink 提供了非常稳定的数值计算函数,并且由于 MATLAB 语言更接近数学语言表达,使得在程序调试、查错排错上的花费大大减少,用户可以将大量精力集中于数学建模和仿真结果分析上,而不是将时间消耗在程序调试之中。

仿真模型验证通常的方法是将数学模型的解析结果(或理论结果)与仿真所得到的数值结果相比较来完成的;或通过已知的系统输入/输出结果,对比在相同条件下的系统仿真结果来验证仿真模型的正确性。

7. 仿真模型的确认

仿真模型的确认是确定仿真模型是否按照设计所要求的精度代表了实际系统,即仿真模型是否合理。可通过将模型与现实系统相比较来确认仿真模型。例如,对于无线信道可以有不同的数学建模,而这些数学模型对于特定条件下的实际无线信道的近似程度往往是不同的。模型验证和确认对于系统仿真结果的有效性是至关重要的。工程实践中,在图上作业,仿真试验得出相关结果后,还要进行现场踏勘。此时可以验证建模与仿真的结论与实地的测量结果的差异,对仿真模型进行分析和评估。但是系统仿真界对模型验证和确

认的理论研究还比较少,重视程度也不够。根据美国西北大学 Hoover 教授的调查,在有关仿真的论文中,提到模型验证和确认的文献数目不足 30%,而绝大部分论文根本没有提及模型验证和确认的问题。

8. 仿真试验设计

仿真试验设计就是确定仿真试验方案,包括系统激励信号的设计、系统仿真时间的设计、仿真运行次数的设计以及仿真系统的其他参数设计等。

9. 计算机仿真模型的运行

根据仿真试验设计的方案,让计算机执行计算,并在执行计算的过程中了解仿真模型对于各种不同输入信号以及不同参数和仿真机制下的输出,得出试验数据,从而预测系统在实际环境中的运行情况。

10. 计算机仿真结果分析

对仿真模型的运行阶段所产生的数据进行分析,其目的是从运行阶段所产生的数据中找出系统运行规律,对仿真系统的性能作出评价,为系统方案的最终决策提供辅助支持。对仿真结果的分析通常采用统计学的分析方法,对仿真数据的可靠性、一致性、置信度等作出判定,最终将仿真结果以动画、曲线、图表和文字等形式形成仿真报告或论文。在 MATLAB/Simulink 中提供了非常方便的数据分析函数和显示工具,如作图、示波器、频谱分析仪、动画、统计工具箱中的各种统计分析函数、数据插值等。

1.2.3 电子通信系统计算机仿真的优点和局限性

应用 MATLAB/Simulink 的计算机仿真具有经济、安全、可靠、编程简易以及试验周期短等特点,在工程领域得到了越来越广泛的应用。电子与通信领域与计算机技术有着天然的联系,使得电子与通信领域的计算机仿真应用更为活跃。

现代电子系统和现代通信系统通常是复杂的大规模系统,在噪声和各种随机因素的影响下,很难通过解析方法求得系统的数学描述,即使有一些相对较简单的问题,能够写出数学表达式,但往往也难以使用解析法得到解答,这时系统仿真也就成为了一个极为有效的工具。利用仿真技术往往可以绕过艰深的甚至是不可能的数学解析求解,而较为轻易地获得问题的数值解。随着计算机硬件技术和仿真软件的发展,计算速度大大提高,而编程的复杂性也大大简化,因此计算机仿真技术已经成为了现代电子系统和现代通信系统研究的主要手段。

另外,在现代通信系统协议的性能研究中,直接试验几乎是不可能的,在这种情况下只能通过仿真数据来检验所选用的对象,以验证有关的假设。在学习和研究通信系统理论的过程中,仿真技术也是验证理论、进行探索和发现的有效工具。

当然,计算机仿真技术在实际应用中也存在一些问题,应加以重视。这些问题主要是:

(1) 模型的建立、验证和确认比较困难。在系统分析和设计的初始阶段,往往对系统的认识还不深,对实际对象的抽象以及模型的有效性又没有明确的衡量指标,因此难以识别仿真所产生的虚假结果。

(2) 对实际系统的建模的原理和方法不正确,或者建模时的假设条件、参数的选取、模型的简化使得与实际系统的差别较大。

(3) 建模过程中忽略了部分次要因素,使得模型仿真结果偏离实际系统。在建模中忽略哪些因素往往是凭借建模者的经验主观取舍的,这就不可避免地会造成模型与实际系统之间的差异。

(4) 仿真试验时间太短。运行仿真的次数过少,仿真试验时间太短,将得不到足够的统计样本数据,从而给结果分析带来较大误差。例如,在通信系统接收误码率的仿真试验中,当信噪比较高时,要得到高置信度的误码率数据必须试验足够多的数据,即便现代计算机的运算速度已经大大提高,但与理论计算相比,仿真对计算机而言始终是一项极为耗时的的工作。

(5) 随机变量的概率分布的类型或参数选取不当。通信系统的仿真模型中,噪声是利用伪随机数来表示的,这些随机变量服从一定的概率分布。如果实际系统中的噪声分布与仿真中所用的随机变量分布存在较大差异,那么必然会造成仿真结果的误差。

(6) 仿真输出结果的统计误差。对仿真输出数据的分析有严格的要求。对于不同的仿真模型所适用的统计方法也可能有所不同。

(7) 计算机字长、编码和应用算法也会影响仿真结果。在 Simulink 中应特别注意所选用的求解算法的适用性。

总之,在考查复杂系统时,这些系统往往具有随机性的复杂性而无法用准确的数学方程描述并利用解析方法求解,当找不到其他更好的办法时,才借助计算机仿真技术来分析研究问题。而当问题存在解析解答时,仿真一方面用来验证理论的正确性和在实际环境中的适用性,另一方面也用于验证仿真模型自身的有效性和正确性。

1.3 本书的内容结构

本章简要介绍了学习仿真方法的意义、电子通信系统的建模与仿真的基本方法以及全书的内容结构。随后各章的内容安排如下:

第 2 章重点介绍了 MATLAB 软件的使用,较系统地讨论了应用 MATLAB 软件进行仿真的原理、Simulink 的工作过程和 S 函数编程原理,并举例说明了三种仿真方法: M 文件编程仿真方法、Simulink 建模与仿真方法以及两者混合仿真的方法及其应用。

第 3 章详细说明了应用 Simulink 方法仿真中的常用仪器,如示波器、X-Y 记录仪、逻辑分析仪、相位仪、频谱仪、星座图仪、眼图仪、瀑布图仪和误码表的构建方法,并列举了大量应用实例。

第 4 章介绍了 Simulink 在电路仿真试验中的应用。对电子工程实践中经常碰到的相加、微积分、触发、分频、门控、移位寄存器、可编程开关和驻波形成的仿真实例进行了讨论。最后还介绍了超外差式接收机的仿真试验。

第 5 章是本书的重点,详细讨论了针对现代数字通信系统中各个功能模块的建模与仿真问题。结合数字通信原理的内容,系统地介绍了信源、信源编码、模拟及数字调制、差错控制、交织与置乱、频率合成、多址技术和传输信道的建模仿真的基本方法,给出了大量实例。

第 6 章在系统介绍了 MATLAB 软件的数据可视化(二维、三维、动画)表达方法之后,