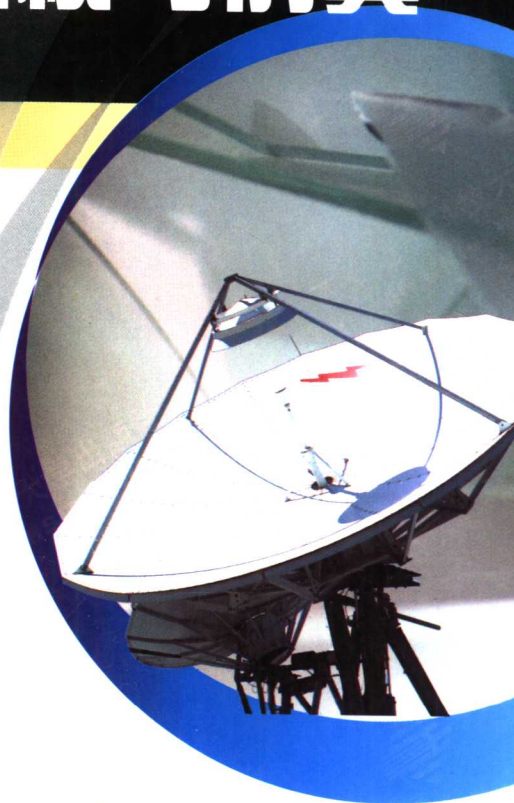
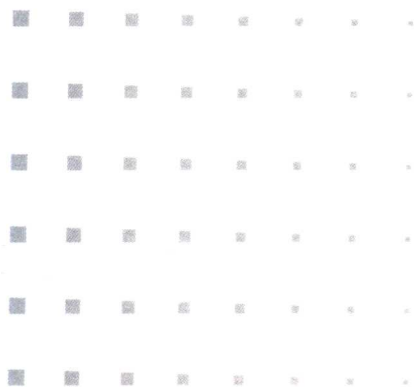


21
面
CENTURY

高等学校信息工程类专业规划教材

现代通信系统建模与仿真

陈树新 邓 妍 姚如贵 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

内 容 简 介

本书全面、系统地介绍了通信系统建模与仿真的基本理论、方法和实现技术,重点介绍利用波形级仿真技术来评估通信系统性能的方法。全书共分9章,内容包括绪论(主要讲述建模与仿真的基本概念)、仿真与建模方法论、仿真中的随机过程分析、蒙特卡洛仿真与随机数的产生、通信系统的建模、通信信道及其模型、仿真中的参数估计、仿真中的性能指标估计以及案例研究:CDMA系统的性能评估。

本书的编排注意理论与实践的结合,讲述由浅入深,简明透彻,概念清晰,重点突出,既便于教师教学,又利于学生自学。

本书可作为电子信息及通信工程专业本科生和研究生的教材,也可供相关专业的教学、科研及工程技术人员阅读和参考。

★本书配有电子教案,需要的老师可与出版社联系,免费提供。

图书在版编目(CIP)数据

现代通信系统建模与仿真/陈树新,邓妍,姚如贵编著.

—西安:西安电子科技大学出版社,2007.7

面向21世纪高等学校信息工程类专业规划教材

ISBN 978-7-5606-1834-0

I. 现… II. ①陈… ②邓… ③姚… III. ①通信系统-系统建模-高等学校-教材

②通信系统-系统仿真-高等学校-教材 IV. TN914

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第060190号

策 划 臧延新

责任编辑 张 梁 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

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2007年7月第1版 2007年7月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张16.875

字 数 397千字

印 数 1~4000册

定 价 21.00元

ISBN 978-7-5606-1834-0/TN·0372

XDUP 2126001-1

*** 如有印制问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

随着通信技术的飞速发展,通信系统的结构和功能变得越来越复杂,从而迫使人们在通信系统的研究与开发上投入更多的时间和精力。为了及时、高效、省力地完成各类研发工作,需要使用强大的计算机辅助分析和设计工具。因此,利用计算机仿真技术对通信系统进行分析和研究,就形成了现代通信系统建模与仿真这一新兴的研究方向。与这个研究方向相关的基本理论、方法和实现技术是本书的论述中心。

全书共分9章,重点介绍利用波形级仿真技术来评估通信系统性能的基本理论、方法和实现技术。具体章节内容安排如下:

第1章介绍了系统、模型与仿真的基本概念,并结合通信系统的特点,介绍了通信系统仿真的方法、通信系统分层仿真观点以及仿真在通信系统设计中的应用。

第2章讨论了仿真与建模方法论的有关内容,这些内容涉及到高效、简洁和准确地进行仿真建模的具体实施手段。当然,在建模与仿真的过程中,其准确性、复杂性和计算资源之间需要根据实际情况进行权衡。

第3章在简要介绍了概率论基础之后,介绍了通信系统仿真过程所必需的随机过程理论,内容包括随机信号与噪声的特征表述,以及它们通过线性系统后的基本性能分析。

第4章在学习了蒙特卡洛仿真原理的基础上,主要介绍了产生随机过程采样值的一些方法(这些随机序列是用于驱动MC仿真的),最后对所产生的输入波形,即随机序列的质量进行了评估。

第5章对通信系统的主要模块进行了分析研究,这些模块包括信源及信源编译码部分、数字基带传输子系统、信道编码部分、调制与解调子系统、同步子系统等,最后介绍了仿真的标校过程。本章通过对这些模块的研究,能够使读者基本掌握通信系统的建模过程。

第6章介绍了几种通信信道模型的构建方法,为研究通信系统的性能提供了保障。

第7章以通信系统仿真为背景,介绍了信号参数估计的理论和方法,重点分析了参数估计的精度与运行时间的关系,为确定最佳的估计方案提供了理论依据。

第8章研究了仿真中的性能指标的估计方法,对于模拟通信系统,其性能指标是指信噪比;对于数字通信系统,其性能指标是指误码率。

第9章结合对IS-95标准CDMA移动通信系统性能的评估,从仿真方法论的角度提出问题,并指出了具体解决问题的思路。

本书以电子信息和通信工程类学科为应用背景,在选材上,强调建模仿真的基本理论、方法和实现技术,以及对其结果的研究与分析,尽量减小与具体仿真语言或环境的关联性,充分提高学生提出、研究、分析通信问题的实际能力;在编排上,强调内容的提炼,避免抽象的理论表述与复杂的数学推导,加强必要的物理概念和应用背景的讲解;在内容上,力求简明扼要、深入浅出,着重基本概念、基本原理和基本技术的阐述。本书的参考学时为54学时,当然,讲授内容也可以根据课程设置的具体情况、专业特点和教学要求自由取舍。

本书第1、5、7、8、9章及附录由陈树新编写,第2、3、4章由邓妍编写,第6章由姚如贵编写。全书由陈树新规划并统稿。

在本书的编写过程中,作者参阅了大量的国内外文献,在此向这些文献的作者表示敬意和感谢。

由于现代通信系统建模与仿真的理论和技术的发展十分迅速,加之作者水平有限,因此书中难免存在错误和不足,恳请读者批评指正。

作者联系方式 E-mail: chenshuxin68@163.com

编者
2007年5月

目 录

第 1 章 绪论	1	的应用	33
1.1 系统、模型与仿真	1	2.7.2 通信系统中的有效性分析	34
1.1.1 系统	1	2.7.3 仿真技术的具体应用	35
1.1.2 模型	2	小结	37
1.1.3 仿真	3	思考与练习	38
1.2 通信系统中的仿真	4	第 3 章 仿真中的随机过程分析	39
1.2.1 通信系统仿真的方法	5	3.1 概率论基础	39
1.2.2 通信系统分层仿真观点	6	3.1.1 随机事件与概率	39
1.2.3 仿真在通信系统设计中的应用	7	3.1.2 随机变量与概率分布	41
思考与练习	8	3.1.3 单随机变量模型	43
第 2 章 仿真与建模方法论	9	3.2 随机过程的基本概念	48
2.1 仿真的方法论	9	3.2.1 随机过程的一般表述	48
2.1.1 仿真与分析	9	3.2.2 随机过程的统计特性	49
2.1.2 通信仿真的方法论	10	3.3 平稳随机过程及其特性分析	51
2.2 建模的基本概念	11	3.3.1 平稳随机过程及其各态历经性	51
2.2.1 建模的层次结构	11	3.3.2 平稳随机过程的特性分析	53
2.2.2 系统建模的基本方法	12	3.4 噪声	55
2.2.3 虚拟系统建模	13	3.4.1 调制信道模型简介	55
2.2.4 混合仿真	15	3.4.2 噪声的分类	56
2.3 性能评估方法	15	3.4.3 起伏噪声	57
2.4 仿真中的误差源	17	3.4.4 白噪声和带限白噪声模型	59
2.4.1 系统建模误差	18	3.4.5 量化噪声	60
2.4.2 设备建模误差	19	3.5 随机过程的模型	66
2.4.3 随机过程建模误差	20	3.5.1 随机序列	66
2.4.4 处理误差	22	3.5.2 泊松过程	71
2.5 系统仿真的验证	24	3.5.3 高斯随机过程	74
2.5.1 设备模型的验证	25	3.6 随机过程通过线性系统	76
2.5.2 随机过程模型的验证	26	3.6.1 基本概念	76
2.5.3 系统模型的验证	27	3.6.2 窄带随机过程	78
2.6 时间连续信号的采样	27	3.6.3 正弦波加窄带高斯噪声	80
2.6.1 采样及采样定理	27	小结	81
2.6.2 时间连续信号的恢复	30	思考与练习	82
2.6.3 多速率采样	31	第 4 章 蒙特卡洛仿真与随机数的产生	85
2.7 仿真在通信系统设计中的作用	33	4.1 蒙特卡洛仿真原理	85
2.7.1 仿真在通信系统不同设计阶段			

4.1.1 蒙特卡洛仿真的定义	85	5.7.1 同步技术对仿真的影响	149
4.1.2 蒙特卡洛仿真的变形—— 准解析仿真	87	5.7.2 载波同步恢复	151
4.2 随机数的产生	88	5.7.3 位同步恢复	153
4.2.1 均匀分布随机数的产生	88	5.8 仿真的标校	155
4.2.2 由任意概率密度函数生成 随机数的方法	91	5.8.1 信号功率	155
4.2.3 高斯随机变量的产生	95	5.8.2 噪声功率	156
4.3 独立随机序列的产生	97	小结	157
4.3.1 高斯白噪声序列	97	思考与练习	158
4.3.2 二进制伪随机序列	98	第6章 通信信道及其模型	159
4.3.3 M进制伪随机序列	105	6.1 准自由空间信道	159
4.4 相关随机序列的产生	107	6.1.1 晴空大气(对流层)信道	159
4.4.1 相关高斯标量序列	108	6.1.2 降雨大气信道	160
4.4.2 相关高斯矢量序列	110	6.1.3 电离层相位信道	160
4.4.3 相关非高斯序列	112	6.2 衰落与多径信道	161
4.5 随机数产生器的测试	112	6.2.1 阴影衰落	162
4.5.1 平稳性与非相关性	113	6.2.2 多径衰落	163
4.5.2 拟合优良度检测	115	6.3 多径衰落信道的结构模型	167
小结	117	6.3.1 弥散多径信道模型	167
思考与练习	118	6.3.2 离散多径信道模型	170
第5章 通信系统的建模	119	6.3.3 抽头增益过程的生成	172
5.1 通信系统建模的方法与原则	119	6.4 有限状态信道模型	173
5.2 信源及信源编码	120	6.4.1 有限状态无记忆模型	174
5.2.1 信源	120	6.4.2 隐马尔可夫模型(HMM)	174
5.2.2 信源编码	122	6.4.3 Fritchman 模型	177
5.3 数字基带	125	6.5 衰落信道中通信系统的仿真方法	178
5.3.1 逻辑到逻辑的映射	125	6.5.1 波形级仿真	179
5.3.2 逻辑到波形的映射	127	6.5.2 码元级仿真	180
5.3.3 二进制数字基带通信系统 仿真	129	6.5.3 语音编码级仿真	180
5.4 信道编码	130	6.6 移动信道的参考模型	180
5.4.1 分组码	130	6.6.1 线路损耗模型	181
5.4.2 卷积码	134	6.6.2 信道冲激响应模型	181
5.4.3 编码通信的链路仿真	138	小结	183
5.5 调制系统	138	思考与练习	183
5.5.1 模拟调制	139	第7章 仿真中的参数估计	184
5.5.2 数字调制	140	7.1 参数估计的基本概念	184
5.5.3 仿真与实现	143	7.1.1 理论背景和基本概念	184
5.6 解调与检测	144	7.1.2 估计器的性能	186
5.6.1 相干解调	145	7.2 波形平均电平和平均功率估计	188
5.6.2 非相干解调	146	7.2.1 波形平均电平估计	188
5.7 同步	148	7.2.2 波形平均功率估计	191
		7.3 波形幅度概率密度和分布函数 估计	193
		7.3.1 经验分布	193

7.3.2 直方图	194	8.5.2 偏差概率密度函数的选择	230
7.4 信号功率谱密度估计	196	8.6 准解析方法	232
7.4.1 估计器的基本形式	196	8.6.1 准解析方法的基本原理	232
7.4.2 估计器的修正形式	198	8.6.2 用于二进制系统的 QA 方法	233
7.4.3 估计器的期望值与方差	200	小结	235
7.4.4 实现 PSD 的估计器	202	思考与练习	235
7.5 时延和相位估计	204	第 9 章 案例研究: CDMA 系统的	
7.5.1 无噪声环境下载波相位和定时同步的估计	204	性能评估	236
7.5.2 分组估计器	205	9.1 CDMA 系统性能仿真的总体思路	236
7.6 性能的目测指标	208	9.2 CDMA 系统介绍	238
7.6.1 眼图	208	9.2.1 CDMA 系统原理及特点	238
7.6.2 散布图	209	9.2.2 频率和信道规范	239
小结	209	9.2.3 CDMA 上行信道	240
思考与练习	210	9.2.4 CDMA 下行信道	241
第 8 章 仿真中的性能指标估计	211	9.3 上行链路仿真	242
8.1 信噪比估计	211	9.3.1 上行链路的仿真模型	243
8.1.1 信噪比估计器的形式	211	9.3.2 仿真运行	246
8.1.2 估计器的统计特性	213	9.4 下行链路仿真	247
8.1.3 估计器的实现	214	9.4.1 下行链路的仿真模型	247
8.2 数字系统性能估计的基本概念	216	9.4.2 仿真运行	249
8.2.1 性能描述和运行时间	216	9.5 有限状态信道特性	249
8.2.2 理论框架	217	9.5.1 离散信道建模	250
8.3 数字系统性能估计的 MC 方法	219	9.5.2 模型分析	253
8.3.1 估计器形式	219	小结	254
8.3.2 MC 估计器的置信区间	220	附录	255
8.3.3 MC 估计器的均值和方差	223	附录 1 傅里叶变换	255
8.4 尾部外推法	225	附录 2 离散傅里叶变换(DFT)	256
8.4.1 估计器形式	225	附录 3 几种通信系统仿真中常用的概率分布	258
8.4.2 估计器的性能分析与实现	228	附录 4 误差函数表	259
8.5 重要事件采样法	229	参考文献	261
8.5.1 重要事件采样法的工作原理	229		

第1章 绪 论

随着计算机技术的发展,计算机仿真技术已经成为分析和研究各种系统,尤其是复杂系统的重要工具,它不仅用于工程领域,如机械、航空、航天、电力、冶金、化工和电子等方面,还广泛用于非工程领域,如交通管理、生产调度、库存控制、生态环境以及社会经济等方面。在今天发展最为迅猛的通信领域中,各类系统的结构和功能变得越来越复杂,从而迫使人们在通信系统的研究与开发上投入更多的时间和精力。为了及时、高效、省力地完成各类研发工作,需要充分利用强大的计算机辅助分析和设计工具。

本章将简要介绍系统、模型与仿真的基本概念,并结合通信系统的特点,介绍通信系统仿真的方法、通信系统分层仿真观点以及仿真在通信系统设计中的应用。

1.1 系统、模型与仿真

1.1.1 系统

系统这一词最早出现在古希腊原子论创始人德谟克利特(公元前460~公元前370年)的著作《世界大系统》一书。该书明确地论述了系统的含义,它指出“任何事物都是在联系中显现出来的,都是在系统中存在的,系统的联系规定每一事物,而每一联系又能反映系统联系的总貌”。著名学者戈登在总结前人思想的基础上,将系统定义为“按照某些规律结合起来,互相作用、互相依存的所有实体的集合或总和”。现在一般认为,系统是指由若干相互关联、互相作用的事物按一定规律组合而成的具有特定功能的整体。系统可以具有不同的属性和规模。

根据上述定义,可以把实现通信功能的各个实体定义为一个系统,称之为通信系统。该系统的任务是传输消息,这些消息可以是语音、文字、图像、数据或指令等。为了便于消息的传输,先由转换设备将所传消息按一定规则变换为相对应的信号,信号形式多样,可以是电信号,也可以是光信号,它们通常是随时间变化的电流、电压或光强;然后经过适当的信道(即信号传输的通道,如传输线、电缆、空间、光纤和光缆等)将信号传送到接收方;最后由接收设备将接收到的信号还原为语音、文字、图像、数据或指令等。实际上在通信领域中,对系统的定义存在较大的差异,例如,通信设备中的滤波器就可以认为是一个简单系统;而由同步卫星和地面站组成的卫星通信是一个庞大的复合系统,它不仅包括完成通信任务的通信系统,还包括保障卫星正常运行的各类子系统。

这样看来,定义一个系统时,首先要确定系统的边界。尽管世界上的事物是相互联系

的，但是当我们研究某一对象时，总是要将该对象与其环境区别开来。边界确定了系统的范围，边界以外对系统的作用称为系统的输入；系统对边界以外的环境的作用称为系统的输出。尽管世界上的系统千差万别，但人们总结出了描述系统的“三要素”，即实体、属性和活动。实体确定了系统的构成，也就确定了系统的边界；属性也称为描述变量，它描述了每一实体的特征；活动定义了系统内部实体之间的相互作用，从而确定了系统内部发生变化的过程。

1.1.2 模型

为了研究、分析、设计和实现一个系统，需要进行实验。实验的方法通常可分为两大类：一类是直接的真实系统上进行；另一类是先构造模型，通过对模型的实验来代替或部分代替对真实系统的实验。传统上大多采用第一类方法。随着科学技术的发展，尽管第一类方法在某些情况下仍然是必不可少的，但第二类方法日益成为人们更为常用的方法，其主要原因在于：

- (1) 系统还处于设计阶段，真实的系统尚未建立，人们需要更准确地了解未来系统的性能，这时就只能通过对模型的实验来了解；
- (2) 在真实系统上进行实验可能会引起系统破坏或发生故障，例如，对一个处于运行状态的化工系统或电力系统进行没有把握的实验，将会冒巨大的风险；
- (3) 需要进行多次实验时，难以保证每次实验的条件相同，因而无法准确判断实验结果的优劣；
- (4) 实验时间太长或费用昂贵。

因此，在模型上进行实验日益为人们所青睐，建模技术也就随之发展起来了。根据建模方法不同可以把模型分为两大类：一类是物理模型，就是采用一定比例尺按照真实系统的“样子”制作，沙盘模型就是物理模型的典型例子；另一类是数学模型，就是用数学表达式来描述系统的内在规律。

对于数学模型而言，当系统的激励是连续信号时，若其响应也是连续信号，则称其为连续系统；当系统的激励是离散信号时，若其响应也是离散信号，则称其为离散系统。连续系统与离散系统常组合使用，可称为混合系统。描述连续系统的数学模型是微分方程，而描述离散系统的数学模型是差分方程。

如果系统的数学模型只有单个输入和单个输出信号，则称为单输入—单输出系统，如图 1.1-1(a)所示；如果系统含有多个输入和多个输出信号，则称为多输入—多输出系统，如图 1.1-1(b)所示。这里仅考虑单输入—单输出系统。

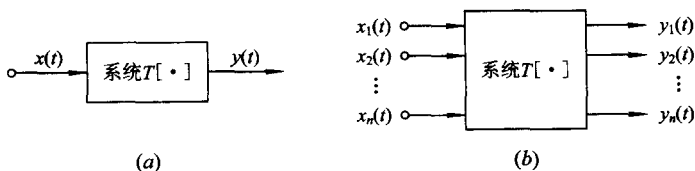


图 1.1-1 系统模型

(a) 单输入—单输出系统；(b) 多输入—多输出系统

从数学模型的观点来观察系统，系统输入信号 $x(t)$ 和输出响应 $y(t)$ 之间存在着如下的

函数关系:

$$y(t) = T[x(t)] \quad (1.1-1)$$

式中, T 是算子, 它的意思是 $x(t)$ 经过算子 T 所规定的运算, 得到 $y(t)$ 。式(1.1-1)可以理解为, 激励 $x(t)$ 作用于系统, 所引起的响应为 $y(t)$ 。

下面就从式(1.1-1)这个函数关系式(数学模型)的特点出发, 对系统进行分类。

1. 线性和非线性系统

线性性质包含两方面的内容: 齐次性和可加性。

设 α 为任意常数, 若系统的激励 $x(t)$ 增大 α 倍时, 其响应 $y(t)$ 也增大 α 倍, 即

$$T[\alpha x(t)] = \alpha T[x(t)] \quad (1.1-2)$$

则称该系统是齐次的或均匀的。

若系统对于激励 $x_1(t)$ 与 $x_2(t)$ 之和的响应等于各个激励所引起的响应之和, 即

$$T[x_1(t) + x_2(t)] = T[x_1(t)] + T[x_2(t)] \quad (1.1-3)$$

则称该系统是可加的。由此可知, 所谓可加性, 是指当有多个激励作用于系统时, 系统的总响应等于各激励单独作用时的响应之和。

2. 时变和时不变系统

如果系统的参数都是常数, 即它们不随时间变化, 则称该系统为时不变系统或常参量系统; 否则称为时变系统。如果利用数学语言来描述时不变系统, 那么系统输入信号 $x(t)$ 和输出响应 $y(t)$ 之间存在着如下的函数关系:

$$y(t - t_0) = T[x(t - t_0)] \quad (1.1-4)$$

线性系统可以是时不变的, 也可以是时变的。描述线性时不变(Linear Time Invariant, LTI)系统的数学模型是常系数线性微分(或差分)方程, 而描述线性时变系统的数学模型是变系数线性微分(或差分)方程。

3. 因果和非因果系统

通常可以将激励与响应的关系看成是因果关系, 即把激励看做是产生响应的原因, 而响应是激励引起的结果。这样, 就称响应出现于激励之后的系统为因果系统, 许多实际系统都是因果系统, 例如收音机、电视机和数据采集系统等; 否则就是非因果系统。

4. 稳定和不稳定系统

对于稳定系统而言, 如果加入有界的激励 $x(t)$, 则系统的响应 $y(t)$ 也是有界的。这也可以说, 向稳定系统中加入有界输入, 则输出有界; 否则, 对于不稳定系统来讲, 一个很小的激励(如干扰电压)就会使系统的响应发散。

1.1.3 仿真

1961年, 摩尔根斯特首次对“仿真”进行了技术性定义, 即“仿真是指在实际系统尚不存在的情况下对于系统或活动本质的实现”。另一个较为经典的对“仿真”进行技术性定义的是考恩, 他在1978年的著作《连续系统仿真》中将仿真定义为“用能代表所研究的系统的模型作实验”。1982年, 斯普瑞特进一步将仿真的内涵加以扩充, 定义为“所有支持模型建立与模型分析的活动即为仿真活动”。欧恩在1984年给出了仿真的基本概念框架, 即“建模—实验—分析”, 在此基础上提出了“仿真是一种基于模型的活动”的定义, 这个定义被

认为是现代仿真技术的一个重要概念。实际上，随着科学技术的进步，特别是信息技术的迅速发展，“仿真”的技术含义将不断地得到发展和完善。

综上所述，“系统、模型和仿真”三者之间有着密切的关系。系统是研究的对象，模型是系统的抽象，仿真则是通过对模型的实验以达到研究系统的目的手段与方法。现代仿真均是在计算机的支持下进行的，因此，系统仿真也称为计算机仿真。计算机仿真三要素和三个基本活动如图 1.1-2 所示。

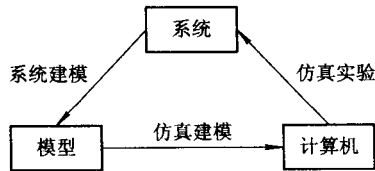


图 1.1-2 计算机仿真三要素和三个基本活动

传统上，“系统建模”这一活动属于系统辨识技术范畴，仿真技术则侧重于“仿真建模”，即针对不同形式的系统模型研究其求解算法，使其在计算机上得以实现。“仿真实验”这一活动往往只注重“仿真程序”的检验功能，至于如何将仿真实验的结果与实际系统的行为进行比较这一根本性的问题，还缺乏必要的研究。

现代仿真技术的一个重要进展是将仿真活动扩展到系统建模、仿真建模和仿真实验这三个方面，并将其统一到同一环境当中。在系统建模方面，提出了用仿真方法确定实际系统的模型。例如，根据某一系统在实验中所获得的输入、输出数据，在计算机上进行仿真实验，以确定模型的结构和参数；基于模型库的结构化建模，采用面向对象建模方法，在类库的基础上实现模型的拼合与重用。

在仿真建模方面，除了适应计算机软、硬件环境的发展而不断研究和开发出许多新算法和新软件外，现代仿真技术还采用模型与实验的分离技术，即实现模型的数据驱动。可将任何一个仿真问题分为两部分，即模型与实验，在这一点上，现代仿真技术与传统仿真技术是一致的。其区别在于：现代仿真技术将模型又分为参数模型和参数值两部分，参数值属于实验框架的内容之一。这样，模型参数与其对应的参数模型就分离开了。仿真实验时，只需对参数模型赋予具体参数值，就形成了一个特定的模型，从而大大提高了仿真的灵活性和运行效率。

在仿真实验方面，现代仿真技术将实验框架与仿真运行控制区分开来。一个实验框架定义一组条件，它们包括模型参数、输入变量、观测变量、初始条件、终止条件和输出说明等。前面已对模型参数进行了说明，除此之外，现代仿真技术与传统仿真技术的区别还在于现代仿真技术将输出函数的定义也与仿真模型分离开来。这样，当需要不同形式的输出时，不必重新修改仿真模型，甚至不必重新仿真运行。

1.2 通信系统中的仿真

在通信系统的建模、分析和设计过程中，现在已经越来越多地采用计算机辅助技术。总体来看，这些计算机辅助技术通常可分为两大类：一类是以公式为基础的方法，这种方

法是利用计算机来计算复杂的公式；而另一类是以波形仿真为基础的方法，这种方法是利用计算机来仿真经过系统的信息流。其中第二种方法是本书研究的主要内容。

利用计算机辅助技术对系统性能进行估计时，需要考虑估计精度与计算机运算量之间的“折衷”。因此，数字通信系统的性能估计和“折衷”问题，将成为通信系统仿真研究的重点。

1.2.1 通信系统仿真的方法

通信系统仿真的方法主要包括公式计算法、波形仿真法以及硬件样机测试研究法。上述三种方法在对通信系统性能估计时可以分别独立采用，也可以组合使用。实际上，较好的技术方案是将这三种方法合理地组合使用。

1. 公式计算法

公式计算法是建立在简化系统模型基础上的，它利用确切的公式计算出设计参数和系统性能之间的对应关系。这种方法有时也被称为解析分析法。

例如，在计算系统性能，如误码率时，通常假设信道中的噪声是加性高斯白噪声，这时 2PSK 信号采用同步检测的系统误码率为

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{r}) \quad (1.2-1)$$

其中， r 为输入解调器的信噪比。以上对信道特性和噪声特性的假设，实际上就是对系统模型的简化和理想化。

从上述例子中可以看到，利用公式计算法很难准确评估复杂的通信系统性能，但是在系统设计的初期阶段，利用它可以给出通信系统性能的概括分析。

2. 硬件样机测试研究法

在系统设计的后期，经常会制造出系统中部分重要的子模块，来确定通信系统总体性能，这就是硬件样机测试研究方法。这是一种精确、可靠的系统性能测试研究方法，但是，这种方法通常造价较高、研制周期较长、很不灵活，当设计的可选择对象较多时，这种方法显然是不可取的。

3. 波形仿真法

当采用波形仿真的方法评估通信系统性能时，可以按要求建立各种形式、各种复杂程度的系统模型。与前两种方法相比，设计者的想象空间得以最好地利用和发挥，因为利用波形仿真法可以轻易地将数学的和经验的模型结合在一起，同时还把测量的器件和实际信号的特性组合到一起，在此之后进行深入细致的分析和设计。不仅如此，还可以利用仿真所产生的波形来测试和验证硬件的功能。

但是，波形仿真法也有它的不足之处，这主要表现在数学计算量过大，需要强大的计算机仿真平台。不过这个缺陷可以通过合理地选择建模和仿真技术予以缓解，这也是本书研究的重要内容。

通信系统的形式是多种多样的，为了说明通信系统仿真方法所涉及到的问题，首先来考察一个数据通信系统的简化模型，如图 1.2-1 所示，这个模型只画出了一个典型数字通信系统的一小部分。

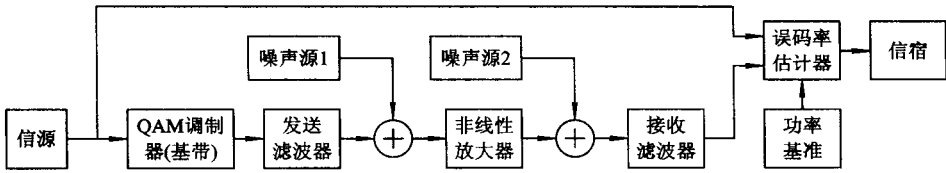


图 1.2-1 数字通信系统的简化模型

对图 1.2-1 中数据通信系统性能的解析估计，实际上就是确定系统误码率与滤波器参数、非线性放大器参数以及信噪比之间的函数关系。在图 1.2-1 所示的系统中，由于存在滤波器和非线性放大器，因而使得利用解析法评估该系统的性能变得十分困难。不仅如此，带限滤波器所造成的码间串扰，以及噪声经过非线性放大器所导致的非高斯和非加性效应，都使得对系统的描述与分析变得非常困难。

为了利用解析法对系统进行有效的描述与分析，在这里需要对某些功能模块进行必要的近似，这些近似包括：忽略发送滤波器和非线性放大器对系统的影响，将两个噪声源合并，并将这两个噪声源的总效应当做加性高斯噪声源处理。这些简化将会影响性能分析的精度，但对于得到系统性能的初步评估是非常有效的。

为了进一步准确估计系统的性能，需要进行波形级仿真。实际评估中通过以下步骤估计误码率：

- (1) 产生输入过程(波形)的采样值，包括信源和两个高斯噪声；
- (2) 利用滤波器和非线性放大器模型处理输入的采样值，产生系统输出采样值；
- (3) 通过比较输入序列的仿真值和输出波形来估计误码率。

对于图 1.2-1 所示的通信系统，无论采用解析分析法还是波形仿真法，它们对通信系统的设计和工程实现都能起到不同的重要作用。

1.2.2 通信系统分层仿真观点

当确定了通信系统性能估计的方法之后，下一步就需要考虑如何对通信系统进行描述。通常采用分层的形式来描述通信系统，使用这种方法可以将复杂的通信系统简单化，简化后通信系统的顶层为通信网络层，中间层为通信链路层，底层为各个模块单元。具体分层描述形式如图 1.2-2 所示。

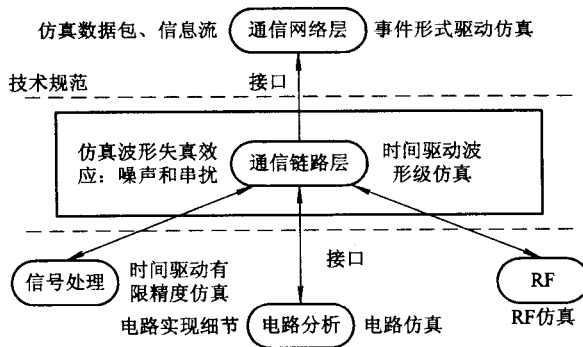


图 1.2-2 通信系统模型分层描述形式

从图 1.2-2 中可以看到,在通信系统模型中,通信网络层在最高层,它由通信节点(处理机)通过通信链路或传输系统相互连接构成。在通信网络层上仿真时,网络上的仿真数据包和信息流以事件形式来驱动系统仿真。为了进行仿真,首先需要确定网络的主要技术参数,这些参数包括处理机速度、节点上缓存器的大小和链路容量等;然后再利用已知的网络参数测试网络的性能指标,这些性能指标包括网络吞吐率和响应时间等;最后根据这些性能指标建立网络通信协议,确定链路数据规范。目前,常用的通信网络层仿真软件主要包括 NS-2 和 OPNET 等。

通信链路层在通信网络层之下,在链路层仿真得到的性能参数,可以上传给通信网络层,用来验证网络的性能。通信链路层研究的主要对象是信道,其性能由误码率来表示,由于信道形式多种多样,因而误码率可以通过在对应信道上的波形仿真得到。目前,常用的仿真软件包括 Matlab(Simulink)、SPW、COSSAP 和 SystemView 等。

底层是建立在一些模块单元基础之上的,这些模块单元包括调制器、编码器、滤波器、放大器、解码器和解调器等,它们可以是模拟电路、数字电路或者可编程的数字信号处理(DSP)芯片。这些模块单元根据其自身特点进行分析研究。目前,常使用的软件工具包括 Spice、Multisim、HDL、DSP 和 RF 等仿真软件。

本书的重点将放在通信链路的波形仿真上。

1.2.3 仿真在通信系统设计中的应用

仿真在通信系统工程设计的各个阶段都起着十分重要的作用,无论是早期的概念设计阶段,还是中期的工程实现阶段,以及最后的测试阶段,都离不开仿真这个有效的工具。

通信系统的工程设计一般是从概念定义开始的,这就是早期的概念设计阶段。在这一阶段中,设计者需要强调设计的顶层技术规范,也就是需要确定系统的信息速率和误码率等性能指标。这些通信系统的性能指标是由两个重要因素确定的,即信号噪声比(SNR)和累积的信号失真。由于这两个因素通常会相互影响、相互制约,因此需要通过仿真进行折衷考虑。

在通信系统的概念设计阶段,信噪比和信号失真的估计是用比较简单的模型和理论推测得到的。例如,为了计算 SNR,滤波器可以用有一定带宽的理想低通滤波器作模型,而由实际滤波器引入的失真则用 SNR 的下降量来等效。在得到 SNR 之后就可以利用通信系统仿真的公式计算法计算系统的性能指标了。如果初始设计产生的候选系统能满足性能目标,则继续进行下一步设计;否则,设计的拓扑逻辑就需要改变,这时相应的信号失真的相关参数也必须修改。

设计的下一阶段也就是中期的工程实现阶段,在这一阶段中需要对子系统和各个模块单元的指标进一步细化,同时还需要验证信号失真。因此,仿真在本阶段显得非常重要。例如,若一个滤波器确定为三阶巴特沃斯滤波器,这时就可以利用波形级仿真来确定滤波器引入信号失真的大小。若经过仿真得到的信号失真小于规定值,则这时可以放松对其它模块单元的要求;否则,就需要提高其它模块单元的设计指标,以满足整个系统对信号失真的要求。对于 SNR 和信号失真折衷研究,以及建立硬件开发的详细规格,利用波形仿真法就显得非常灵活有效,当然,波形仿真法也是这一阶段唯一可用的方法。

在硬件开发的开始阶段,需要对关键部件/子系统进行测试,以确定它们的性能指标,这些硬件样机部件的性能测量值将用于验证仿真中系统端到端的性能。若仿真得到令人满意的结果,则可以制作余下的硬件,完成一个测试一个,最后将整个系统的模型硬件连在一起并予以测试;否则,必须修改技术指标,或者对部分设计进行重新制作。

当系统的硬件样机完成后,就对它进行测试,并将测试结果与仿真结果进行比较。硬件和仿真结果相近的程度是判断仿真是否有效的标准。有效的仿真模型可以用来预测关键部件的老化特性,进而预测整个通信系统运行的使用寿命(EOL)。不仅如此,有效的仿真模型还可以作为故障检修的有效工具。

总之,仿真在通信系统的设计过程中起着重要作用:在概念定义阶段,仿真给出了顶层的技术要求;在设计进行和开发过程中,仿真与硬件开发一起确定最后的技术条件,并检查子系统对整个系统性能的影响;在运行情况下,仿真可以用做检修故障的工具,并且预计系统的 EOL 性能。

必须指出,要使系统仿真的结果精确地与实际情况接近,仿真的模型就应尽可能详细,但仿真占用的资源和耗费的时间与精力就会随之增加。如何在模型的复杂性与仿真的准确性之间找到合适的平衡和折衷,将是实现仿真时需要注意的问题。

思考与练习

- 1-1 描述系统的“三要素”是什么?它们对系统的描述各起到什么样的作用?
- 1-2 为什么人们越来越关注在系统模型上的实验?
- 1-3 计算机仿真的“三要素”是什么?它们之间有什么样的关系?
- 1-4 通信系统的性能估计有哪些方法?各有什么特点?
- 1-5 通信系统的分层仿真观点将一个通信系统分为哪几层?各层有什么特点?
- 1-6 结合某一通信系统的设计过程,说明仿真在其中所起到的作用。

第2章 仿真与建模方法论

通信系统通常是一个具有较长使用寿命的复杂系统，其运行的环境条件往往是变化的，这种变化有可能是周期的，但在大多数情况下是随机的，例如，卫星通信系统、短波通信系统以及远程地面网络等。对于这些复杂系统，它们不仅建设费用很高，而且维护费用昂贵。为了降低上述成本，在通信系统的设计、建设和使用过程中引入仿真技术势在必行，而如何根据实际通信系统的技术要求构建一个有效的仿真模型，就是仿真与建模方法论需要研究的问题。

本章将从仿真学的角度，讨论一系列关于仿真与建模方法论的主题，这些主题内容均是围绕着如何利用高效、简洁和准确的方法，进行通信系统的仿真建模。本章多数讨论以论述的方式展开，希望读者通过学习，建立起正确的仿真与建模方法论。

2.1 仿真的方法论

建立并运行仿真模型需要解决很多方面的问题，归纳起来可以分为“艺术性”和“科学性”两类。仿真的科学性包含理论分析和定量分析等多方面的知识；而仿真的艺术性则与理论分析和定量分析不太相关，它是仿真过程各种技巧的综合，合理地使用这些技巧对于构建、运行仿真系统至关重要。总之，关于如何构建和怎样运行仿真系统的理论，就构成了仿真的方法论。

2.1.1 仿真与分析

理想的仿真系统应该是一个实际系统的完美复制品，要实现这样的系统，由建模的复杂程度以及计算机的运行时间而形成的仿真成本将很高。如果只是为了构建理想的仿真系统模型，同时还拥有无限的计算机资源，则不必考虑仿真的艺术性。但是情况并非如此，在实际设计过程中，需要在限定的条件下建造符合实时要求和近似度要求的模型，这正是仿真的艺术性所涉及的内容。在这一点上，仿真和传统的分析方法是相同的，其中所有的近似都是为了使问题简化。虽然分析与仿真都包含近似处理，但是二者在通信系统的描述方面还存在差异，主要表现在动态特性、模型构建和灵活性上。

1. 动态特性

在分析过程中，典型的计算就是用一个数代表某一个感兴趣的物理量，而在仿真中，波形是随时间动态变化的，因此，在这方面，仿真与分析的区别在于：仿真系统可以提供动态特性，而分析系统不能。这一点在工程设计上是十分重要的，因为仿真系统的动态特

性可以实现对系统不同状态、不同观测点的检测,从而使设计者能够对系统有较为深入和具体地研究。

2. 模型构建

在仿真中,模型可以根据实际系统的具体情况进行构建,约束程度较小;而在分析过程中,由于采用解析法进行处理,因此模型通常按理想方式进行构建。

3. 灵活性

仿真的另一个优点就是它的灵活性,在不影响系统中其它部分性能的前提下,通过仿真可以改变某一部分的特性;而在分析系统中,只要改变系统中的某一部分,就必须对整个系统进行重新分析。仿真的灵活性使系统的设计者实现了对系统从始至终的跟踪,通过对系统中元件的更新以及性能指标的改善,系统模型也得到了相应的更新和改善。

当然,如果一个系统模型可以提供足够深刻和精确的研究,那么系统就可以得到分析性的描述。因此,为了解决一个具体实际问题,所采用的正确的方案都是仿真与分析相结合的处理方法。

2.1.2 通信仿真的方法论

实际的通信系统是非常复杂的,很难完整地实现仿真,这时只有在允许的近似范围内,以较为简单的形式建立系统模型才能实现对通信系统的仿真。归纳起来,实现通信系统仿真通常采用以下两种方案:

(1) 以某种方式降低问题的复杂程度;

(2) 将一个问题分解为多个小问题,把这些小问题的解决方案按照某种方式进行组合,这个组合系统对解决整个大(复杂)问题很有价值。

为了说明上述两种理论思想,下面来分析一个时间离散系统。

设某时间离散系统的输出 V_i , 可表示为

$$V_i = h(\Omega) \quad (2.1-1)$$

式中, h 表示系统的传输特性, $\Omega = (Z_1, Z_2, \dots, Z_k)$ 表示离散的输入序列。仿真的目的就是要得到 $\{V_i\}$ 的一组序列输出。

按照第一种方案,可以简化系统的实验方式,降低问题的复杂程度。这时简化了的系统可以表示为

$$V_i = h'(\Omega) \quad (2.1-2)$$

式中, h' 表示降低了复杂程度的系统传输特性。

按照第二种方案,实际上是将一个大问题转化为简单形式,由一个或几个条件实验来完成。其条件实验产生的输出为

$$V_i = h(\Omega'_i) \quad (2.1-3)$$

式中,用 $\Omega'_i = (Z_1 = \xi_1, Z_2 = \xi_2, \dots, Z_i = \xi_i, Z_{i+1} = \xi_{i+1}, \dots, Z_k = \xi_k)$ 表示 $\Omega = (Z_1, Z_2, \dots, Z_k)$ 。

利用 Ω'_i 来替代 Ω , 表明离散的输入序列为确定某种条件下的输入,因此,这个实验也被称为条件实验。这种条件实验简单、省时,其结果容易理解。如果这类条件实验经过多次试验,并证明可以提供足够的信息量,则可以替代由式(2.1-1)所得到的实验结果。

当然,也可以将第一、二种方案合理结合,构建出简化系统的条件实验方式,即