

21 世纪高等学校通信类规划教材

通信系统建模与仿真

Modeling and Simulation of Communication Systems

韦岗 季飞 傅娟 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

内 容 简 介

本书着重介绍通信系统的波形级仿真技术,内容涵盖建模与仿真基本概念、线性时不变系统的建模与仿真、非线性时不变系统(主要指滤波器)和线性时变系统的建模与仿真、随机过程的建模与仿真、通信系统中的发射子系统与接收子系统的建模与仿真、通信信道的建模与仿真。为便于读者全面地掌握通信系统的建模原理和实现方法,本书在讲解理论知识的同时,还给出了仿真实例和 MATLAB 程序,如多抽样率系统中的滤波器设计、OFDM 技术的建模与仿真、3G 通信标准物理层的建模与仿真等。

本书可作为高等院校电子信息类专业高年级本科生或研究生的教材,本科生课程设计、毕业设计,或研究生论文实验等的参考用书,也可作为从事现代通信系统设计和产品研究开发的专业技术人员的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

通信系统建模与仿真/韦岗,季飞,傅娟编著. —北京:电子工业出版社,2007.6

(21世纪高等学校通信类规划教材)

ISBN 978-7-121-04373-4

I. 通… II. ①韦…②季…③傅… 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 066682 号

责任编辑:韩同平

特约编辑:李佩乾

印 刷:北京市铁成印刷厂
装 订:

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:787×1092 1/16 印张:16.5 字数:450 千字

印 次:2007 年 6 月第 1 次印刷

印 数:5000 册 定价:29.00 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 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

前 言

随着通信技术的迅猛发展,通信系统的功能越来越强、性能越来越高、结构越来越复杂。另一方面,通信系统技术研究和产品开发的周期则越来越短。产生这两个现象的原因在于强大的计算机辅助分析设计技术和仿真工具的出现。通信系统的计算机辅助分析方法主要分为两大类:一是公式的数值计算;二是系统波形的仿真,即波形级仿真技术。本书着重介绍通信系统的波形级仿真技术。

本书的主要特点在于:不仅介绍基本的通信技术和 MATLAB 编程技巧,而且介绍现代通信技术及其建模原理和实现方法。本书力求取材新颖,充分反映目前国内外通信技术的发展,重点讲解现代无线通信系统的波形级仿真实理论与方法,包括 OFDM 技术的建模与仿真、3G 通信标准物理层的建模与仿真等。本书的另一个特点是理论与实际密切结合,应用性强。为便于读者全面透彻地理解通信系统的建模原理和实现方法,本书给出了较多的仿真实例。

通信系统的仿真涉及较多的专业知识,所以读者应具有通信原理、数字信号处理、信号与系统、随机过程等方面的基础。本书中的案例仿真工具是 MATLAB,因而要求读者对 MATLAB 也有一定的了解。

本书共 9 章。

第 1 章叙述建模与仿真的基本概念、作用及通信仿真常用的软件包。

第 2 章简要介绍确定性信号与系统基础,包括确定性信号的特征和分类、采样、带通信号的低通等效方法等。

通信系统中功能模块的仿真模型可以分为三大类:线性时不变因果系统、非线性时不变系统和线性时变系统,分别在第 3 章和第 4 章讨论。第 3 章讨论线性时不变系统的建模与仿真,着重于滤波器设计、仿真与实现。第 4 章讨论非线性时不变系统和线性时变系统。由于非线性时不变系统和线性时变系统的建模与仿真均比较困难,本书只给出一些基本概念与基本理论,不做深入的探讨,有兴趣的读者可以参阅有关参考书。

考虑到在实际的通信系统中,信道噪声、干扰和衰落等随机现象会对接收信号产生影响,导致系统参数的随机变化,第 5 章将专门介绍随机过程的建模与仿真。

第 6 章介绍通信系统中的发射子系统与接收子系统的建模与仿真。虽然通信系统有许多不同的类型,而且使用许多不同的技术,但所有通信系统都包含某些基本的子系统。一个基本的通信系统包括信号源、发射机、传输信道、接收机和目的地;而发射机和接收机又可进一步细化:发射机包括信源编码、信道编码、调制,接收机包括解调、信道译码、信源译码。

第 7 章叙述通信信道的建模与仿真,着重于无线信道。通信信道是指发射机与接收机之间的物理介质,包括有线信道和无线信道。在通信系统设计的初始阶段,建立合理的信道模型并进行仿真是必需的。

第三代移动通信(3G)系统是一个有代表性的现代通信系统,其主流技术为码分多址(CDMA)。第 8 章阐述 CDMA 系统的基本原理及 3G 调制解调技术,作为第 9 章仿真案例的理论基础。

第9章给出四个通信系统的仿真实例，包括两个3G标准（TD-SCDMA和CDMA2000）物理层的仿真，以及单模光纤传输系统的仿真。

本书给出的仿真实例均源自于作者主持的科研项目（国家自然科学基金项目60172048和60101002、广东省科技计划项目（国际科技合作）2005B50101006、广州市科技项目2003Z2-D0201等），在此谨对国家自然科学基金委员会、广东省科学技术厅，以及广州市科技局表示衷心的感谢。

本书可作为高等学校电子信息类专业高年级本科生或研究生的教材，本科生课程设计、毕业设计，或研究生论文实验等的参考用书，也可作为从事现代通信系统设计和产品研究开发的专业技术人员的参考书。

尽管本书经过了作者反复的斟酌及仔细的审校，但限于作者的水平，本书仍难免存在一些错漏和不妥之处，恳请读者批评指正。

对本书的意见和建议欢迎发邮件至： {ecgwei,eefeiji,fujuan}@scut.edu.cn。

编著者
于华南理工大学

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 仿真的基本概念	(1)
1.1.1 仿真的定义及应用领域	(1)
1.1.2 系统的分类	(1)
1.1.3 模型的分类	(2)
1.1.4 系统仿真的分类	(2)
1.2 通信系统仿真	(3)
1.2.1 通信系统	(3)
1.2.2 分层概念	(4)
1.2.3 仿真在通信系统设计中的作用	(6)
1.2.4 通信系统仿真所涉及的领域	(6)
1.3 仿真方法论	(7)
1.3.1 概述	(7)
1.3.2 建模基本概念	(8)
1.3.3 仿真中的误差源	(8)
1.3.4 系统性能估计	(9)
1.3.5 通信仿真软件包	(9)
第 2 章 信号与系统基础	(14)
2.1 信号与系统概述	(14)
2.1.1 信号的特征和分类	(14)
2.1.2 典型信号	(14)
2.1.3 系统的特性	(17)
2.2 采样与内插	(18)
2.2.1 低通和带通采样定理	(18)
2.2.2 重构与内插	(20)
2.3 带通信号和系统的低通等效	(22)
2.3.1 希尔伯特变换 ^[8]	(22)
2.3.2 带通信号的低通复包络	(23)
2.3.3 带通滤波器的低通等效 ^[8]	(27)
习题	(28)
第 3 章 线性时不变系统的建模与仿真	(30)
3.1 滤波器概述	(30)
3.1.1 滤波器定义与分类	(30)
3.1.2 滤波器设计指标	(31)
3.2 无限冲激响应滤波器设计	(33)

3.2.1	模拟低通滤波器设计	(33)
3.2.2	冲激响应不变法	(34)
3.2.3	双线性变换法	(37)
3.2.4	计算机辅助设计	(38)
3.3	FIR 滤波器设计	(40)
3.3.1	窗函数法	(40)
3.3.2	频率采样法	(43)
3.3.3	等波纹线性相位 FIR 滤波器设计	(46)
3.3.4	FIR 线性相位滤波器的约束最小二乘设计	(47)
3.4	滤波器的仿真实现	(47)
3.4.1	IIR 滤波器结构与实现	(47)
3.4.2	FIR 滤波器结构与实现	(48)
3.5	多抽样率系统	(49)
3.5.1	多抽样率系统概述	(49)
3.5.2	样本速率转换原理	(50)
3.5.3	样本速率转换的多级实现	(59)
3.5.4	MATLAB 中的采样率转换函数	(67)
3.6	数字正弦余弦发生器	(68)
	习题	(70)
第 4 章	非线性时不变与线性时变系统的建模与仿真	(72)
4.1	非线性时不变系统的建模与仿真	(72)
4.1.1	非线性器件特性	(72)
4.1.2	非线性系统的类型、模型与仿真要考虑的因素	(73)
4.1.3	无记忆基带非线性器件模型	(74)
4.1.4	无记忆带通非线性器件模型	(75)
4.1.5	高频功率放大器的建模与仿真实例	(76)
4.2	线性时变系统的建模与仿真	(78)
4.2.1	时变系统的时域描述	(78)
4.2.2	时变系统的频域描述	(79)
	习题	(80)
第 5 章	随机过程的建模与仿真	(81)
5.1	概述	(81)
5.1.1	通信系统中的随机现象	(81)
5.1.2	随机过程的建模	(81)
5.2	随机过程的理论基础	(82)
5.2.1	随机过程的基本概念	(82)
5.2.2	随机过程的概率分布	(83)
5.2.3	随机过程的数字特征	(85)
5.2.4	复随机过程	(86)
5.2.5	平稳性	(87)

5.2.6	各态历经性	(88)
5.3	随机信号与线性系统	(89)
5.3.1	随机信号的功率谱密度	(89)
5.3.2	低通与带通随机信号	(91)
5.3.3	带通随机信号的正交模型	(92)
5.3.4	随机信号通过线性系统	(93)
5.3.5	典型随机过程模型	(94)
5.4	平稳随机信号的取样	(96)
5.4.1	低通随机信号的取样	(96)
5.4.2	带通随机信号的取样	(97)
5.5	随机过程的计算机仿真	(98)
5.5.1	均匀分布随机变量的产生	(98)
5.5.2	具有给定分布随机变量的产生	(100)
5.5.3	不相关的高斯随机变量的产生	(103)
5.5.4	相关的高斯随机变量的产生	(104)
5.5.5	MATLAB 库函数实现	(106)
5.6	蒙特卡罗仿真方法论	(107)
5.6.1	基本原理	(107)
5.6.2	一个简单的蒙特卡罗仿真实例	(108)
	习题	(111)
第 6 章	通信系统中发射与接收子系统的建模与仿真	(113)
6.1	通信系统模型	(113)
6.2	信源和信源编码	(115)
6.2.1	量化和编码	(115)
6.2.2	脉冲编码调制	(118)
6.2.3	MATLAB 信源产生函数	(122)
6.3	数字基带调制	(124)
6.3.1	基带信号波形的表示	(124)
6.3.2	AWGN 信道的最佳接收机	(125)
6.3.3	数字基带通信系统的蒙特卡罗仿真	(127)
6.4	基带滤波与脉冲成形	(130)
6.4.1	脉冲成形滤波概述	(130)
6.4.2	根升余弦滤波器的仿真实现	(131)
6.5	数字频带调制	(134)
6.5.1	频带调制概述	(134)
6.5.2	M 进制相移键控 (MPSK)	(135)
6.5.3	最小频移键控	(142)
6.6	多载波调制和 OFDM	(148)
6.6.1	多载波调制系统	(148)
6.6.2	连续 OFDM 信号模型	(149)

6.6.3	基于 IFFT/FFT 的 OFDM 系统模型	(152)
6.6.4	OFDM 系统的仿真	(154)
	习题	(156)
第 7 章	通信信道建模与仿真	(158)
7.1	概述	(158)
7.2	有线信道建模与仿真	(158)
7.3	无线信道传播特性	(160)
7.3.1	小尺度衰落概述	(161)
7.3.2	多径衰落信道的冲激响应模型	(161)
7.3.3	多径衰落信道包络的统计特性	(162)
7.3.4	多径信道的 WSSUS 模型 ^[8]	(163)
7.4	无线信道仿真模型	(165)
7.4.1	自由空间的电波传播模型	(165)
7.4.2	大尺度衰落模型	(165)
7.4.3	Clarke 信道模型	(167)
7.5	无线通信信道仿真实现	(168)
7.5.1	加性高斯白噪声信道	(168)
7.5.2	平坦衰落信道的仿真	(169)
7.5.3	离散多径衰落信道的仿真	(176)
7.5.4	MATLAB 中的无线信道仿真函数	(178)
7.5.5	2G 与 3G 移动通信标准中建议的移动离散信道参考模型	(179)
	习题	(182)
第 8 章	CDMA 系统基本原理	(184)
8.1	扩频通信系统	(184)
8.1.1	香农公式与信息传输差错概率公式	(184)
8.1.2	扩频通信基本概念	(185)
8.1.3	扩频通信系统的工作方式	(186)
8.1.4	码分多址基本原理	(187)
8.2	CDMA 中的码序列	(188)
8.2.1	模 2 加和逻辑乘	(188)
8.2.2	序列的相关运算	(189)
8.2.3	周期序列的相关函数	(189)
8.2.4	实时信号的相关函数	(190)
8.2.5	m 序列	(193)
8.2.6	Gold 码	(199)
8.2.7	Walsh 函数	(200)
8.2.8	可变扩频比正交码 (OVSF 码)	(207)
8.3	3G 中的扩频与调制	(209)
8.3.1	3G 概述	(209)
8.3.2	3G 中的无线接口参数	(210)

8.3.3	3G 中的扩频与加扰	(211)
8.3.4	CDMA2000 调制解调技术	(211)
8.3.5	TD-SCDMA 调制解调技术	(212)
	习题	(214)
第 9 章	通信系统建模与案例研究	(215)
9.1	TD-SCDMA 调制解调仿真	(215)
9.1.1	仿真方框图	(215)
9.1.2	脉冲成形滤波器与低通滤波器	(216)
9.1.3	解扰与解扩	(216)
9.1.4	系统仿真程序与仿真结果	(217)
9.2	CDMA2000 复扩频仿真	(220)
9.2.1	复扩频结构图	(220)
9.2.2	基带滤波	(221)
9.2.3	仿真程序	(222)
9.3	TD-SCDMA 中的信道估计与联合检测	(226)
9.3.1	联合检测概述	(226)
9.3.2	TD-SCDMA 系统的突发结构	(227)
9.3.3	信道估计	(228)
9.3.4	联合检测	(230)
9.3.5	仿真实例	(231)
9.4	单模光纤传输系统	(238)
9.4.1	概述	(238)
9.4.2	单模数字光波系统	(239)
9.4.3	单模数字光波系统仿真	(240)
附录 A	MATLAB 通信工具箱函数一览表	(244)
	参考文献	(249)

第 1 章 绪 论

1.1 仿真的基本概念

1.1.1 仿真的定义及应用领域

仿真技术是分析、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、电子等方面，还广泛用于非工程领域，如交通管理、生产调度及社会经济等方面。1961 年，G.W. Morgenthater 首次对“仿真”进行了技术性定义，即“仿真意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”。Korn 于 1978 年在《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做实验”。1982 年，Spriet 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”。Oren 在 1984 年提出了“仿真是一种基于模型的活动”的定义。随着科学技术的进步，“仿真”的技术含义还在不断地发展。

由仿真的定义可知，系统、模型与仿真三者是密切相关的，系统是研究的对象，模型是系统的抽象，仿真是通过对模型的实验以达到研究系统的目的。

1.1.2 系统的分类

所谓系统是指相互联系又相互作用着的对象的有机组合。无论系统的物理本质如何，可以把一个系统分成五个组件^[4]：实体（Entity）、属性（Attribute）、活动（Activity）、事件（Event）、状态变量（State Variable）。实体即是系统中的人们研究的客观对象，属性指实体的特征，活动是占用一定时间和资源导致系统状态发生改变的一定过程。系统状态是描述在某时间点系统所有实体、属性和活动的变量的集合，状态变量用于系统分析。一个事件定义为可能改变系统状态的即时发生。事件又可分为时间事件和状态事件，时间事件是依照系统的作业规则在预定时间发生的事件，状态事件是当系统状态符合某种条件而发生的事件。表 1-1 给出了系统的实体、属性、活动、事件和状态变量的具体例子。

表 1-1 系统组件的例子

系 统	实 体	属 性	活 动	事 件	状 态 变 量
银行业	客户	支票账户平衡	存取款	到达；离开	正在接受服务的客户数量；正在排队等待的客户数量
快速铁路	旅行者	起点；目的地	旅行	到达车站； 到达目的地	在每个车站等待的旅行者；在途中的旅行者
制造业	机器	速度；容量；损耗率	焊接；印制	损坏	机器的状态（忙，闲，损坏）
通信	消息	长度；终点	发送	到达终点	等待被传送的消息数量

系统可分为连续系统和离散系统。实际的系统很少是完全离散或是连续的，但对大多数系统来说，常常是某种形式的变化占主导地位，因此，把系统分为离散的和连续的还是可

行的。一个连续系统的状态变量随时间是连续变化的，如水坝中的水量（见图 1-1）。

离散系统中的状态变量只是在一系列离散时间点发生变化，且往往是随机的，通常用“事件”来表示这种变化，所以又称离散事件系统。银行是离散系统的一个例子。状态变量是在银行中客户的人数，当一个新的客户进入银行时会发生变化，或当银行对一个客户的服务终止时改变。离散系统的状态变化只在离散时刻发生，如图 1-2 所示。

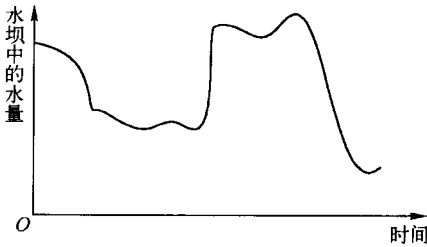


图 1-1 连续系统的状态变量

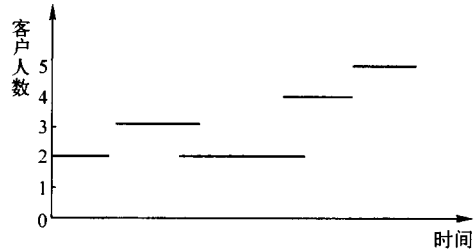


图 1-2 离散系统的状态变量

1.1.3 模型的分类

系统模型是对实际系统的一种抽象，是系统本质的表述，它具有与系统相似的数学描述或物理属性。系统模型的建立是系统仿真的一个重要步骤。模型一般可分为两大类：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。相对而言，物理模型的优点是直观、形象化，但造价昂贵且耗时长，而且在物理模型上做实验，很难修改原有系统的结构，实验受到一定的限制，而数学模型的产生和应用则更为方便和经济，因此，系统仿真中更多地使用数学模型。计算机为数学模型的建立与实验提供了较大的灵活性，人们一般是在计算机上对系统的数学模型进行实验，简称计算机仿真。

数学模型的分类与系统的分类类似，也分为连续模型和离散模型，其定义与连续系统和离散系统类似。另一方面，数学模型在时间域上的变化也可能是连续的或者离散的，分别称为连续时间模型和离散时间模型。一个离散仿真模型并不总是用来仿真一个离散系统，而一个连续仿真模型也不总是用来仿真一个连续系统。比如，一些软件商把管道和消息池建模为离散的，尽管流量应该是连续的。另外，仿真模型也可以是混合型的，既有连续模型环节，也有离散模型环节。比如，用数字计算机控制连续对象组成的计算机控制系统就属于这一类。

模型的类型不同，其数学描述形式也是不同的，表 1-2 给出了各种模型的数学描述形式。由表 1-2 可见，连续模型可以表示成方程的形式，而离散模型通常不能用方程来描述，只能用流程图来描述。这种差别在仿真中尤其重要，因为它们的仿真方法将会有很大的不同。

表 1-2 模型数学描述形式

		状态变量的轨迹	
		连续模型	离散模型
模型的时间集合	连续时间模型	偏微分方程 (PDE) 常微分方程 状态方程 传递函数	活动扫描 事件调度 进程交互
	离散时间模型	Z 变换 差分方程	有限状态机 马尔可夫链

1.1.4 系统仿真的分类

根据模型的种类不同，系统仿真可分为三种：物理仿真、数学仿真和半实物仿真。

按照真实系统的物理性质构造系统的物理模型，并在物理模型上进行实验的过程称为物理仿真。其优点是直观、形象；缺点是模型改变困难，实验限制多，投资较大。

对实际系统进行抽象，并将其特性用数学关系加以描述而得到系统的数学模型，再对数学模型进行实验的过程，即称为数学仿真。数学仿真的缺点是受限于系统建模技术。

半实物仿真将数学模型与物理模型甚至实物联合起来进行实验。

根据被研究系统的特征，数学仿真又可以分为两大类：连续系统仿真及离散事件系统仿真。

连续系统仿真是指对系统状态变量随时间连续变化（包括由于数据采集是在离散时间上进行的，因此时间是非连续的）的系统建立其数学模型，并将它放在计算机上进行实验。这类系统的数学模型包括：连续模型、离散时间模型（差分方程和 Z 变换）及连续-混合模型，其基本特点是能用一组方程式来描述。

离散事件系统仿真对那些系统状态只在一些离散时间点上由于某种随机事件的驱动而发生变化的系统进行仿真实验，是事件驱动仿真。离散事件系统中的事件是离散时刻随机产生的，通常这类系统不能用方程来描述，只能用流程图来描述。我们给出一个单服务台排队系统来说明离散事件系统仿真的特点。例如，有一个单人理发店，开门时间为上午 9:00 到下午 5:00，顾客是随机到达的，理发员为每个顾客服务的时间也是随机的，要求通过仿真估计该理发店的工作情况，以决定是否增加理发员。图 1-3 给出了该系统的流程图。

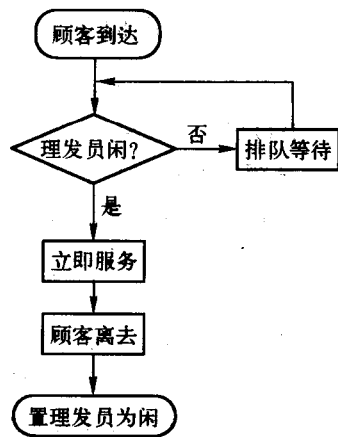


图 1-3 单服务台排队系统流程图

1.2 通信系统仿真

1.2.1 通信系统

通信系统是指完成信息传递所需的一切设备及传输媒介的总和。广义地讲，通信系统涵盖全球通信网络、地球同步通信卫星、陆地微波传输系统、集群通信系统、个人通信系统或者一个调制解调器。每个系统都涉及不同的层次。

一个点对点数字通信系统的模型一般可由图 1-4 表示。

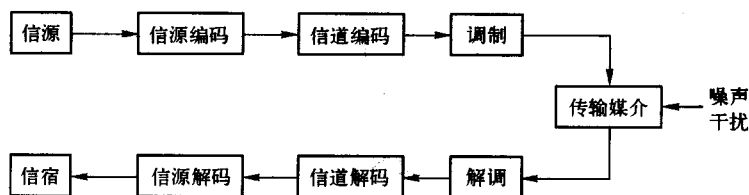


图 1-4 点对点数字通信系统的组成

图 1-4 所示的系统是单向通信系统，但在大多数场合通信双方是收发兼备的，即是双向通信。如果双方有各自的传输媒介，则双方都可以独立地进行发送与接收；但若共享一个

GGSN	Gateway GPRS Support Node	GPRS 网关支持节点
HLR	Home Location Register	归属位置寄存器
MSC	Mobile Services Center	移动业务中心
GMSC	Gateway MSC	网关 MSC
PS	Packet Switched	分组交换
RNC	Radio Network Controller	无线网络控制器
RNS	Radio Network Subsystem	无线网络子系统
SGSN	Serving GPRS Support Node	GPRS 服务支持节点
UE	User Equipment	用户设备
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System	通用移动通信系统
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network	UMTS 陆地无线接入网
VLR	Visitor Location Register	访问位置寄存器
PLMN	Public Land Mobile Network	公共陆地移动网络
PSTN	Public Switched Telephone Network	公共电话交换网络

通用移动通信系统 (UMTS) 由通用陆地无线接入网络、核心网络、用户设备 (UE) 和外部网络 (EN) 组成。UE 识别用户身份和提供各种业务功能, UTRAN (UMTS 陆地无线接入网) 处理所有与无线有关的功能, 核心网 (CN) 处理 UMTS 内所有的语音呼叫和数据连接, 并实现与外部网络的交换和路由功能。CN 从逻辑上分为电路交换域和分组交换域。EN 提供各种其他外部网络信息连接与交换。

UTRAN 由若干个通过 Iu 接口连接到核心网 (CN) 的无线网络子系统 (RNS) 组成, 其中一个 RNS 包含一个 RNC 和一个或多个 Node B。而 Node B 通过 Iub 接口与 RNC 相连接。在 UTRAN 内部, RNC 之间通过 Iur 接口进行信息交互。Iu 和 Iur 是逻辑接口, Iur 接口可以是 RNC 之间的直接物理连接, 也可以通过任何合适传输网络的虚拟连接来实现。

图 1-7 给出了 TD-SCDMA 标准中无线接入网与用户设备之间的 Uu 接口结构。Uu 接口也叫做无线接口, 或者空中接口。由图 1-7 可看出, 空中接口主要由物理层 (L1)、数据链路层 (L2) 和网络层 (L3) 组成。

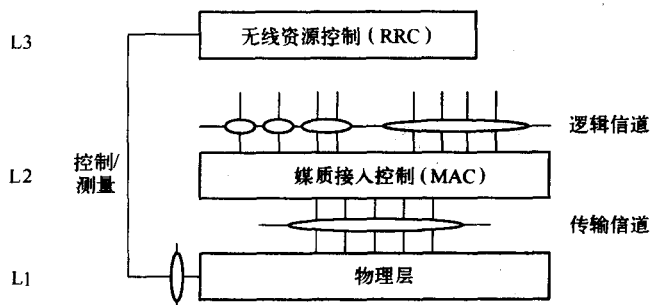


图 1-7 TD-SCDMA 空中接口协议结构

物理层是空中接口的底层, 支持比特流在物理介质上的传输。物理层的重点是如何最有效地利用频谱资源的调制、信源编码、信道编码及检测技术。物理层与数据链路层的 MAC 子层及网络层的 RRC 子层相连。MAC 子层是数据链路层中控制多址通信的部分。物理层

向 MAC 层提供不同的传输信道，传输信道定义了信息是如何在空中接口上传输的。物理信道在物理层，由频率、时隙、信道码、训练序列位移和无线帧分配等参数来定义，物理层受 RRC 的控制。物理层向高层提供数据传输服务，这些服务的接入是通过传输信道来实现的。

在数据链路层，重点是如何在时间上、频率上或空间上共享频谱。在高层，频谱共享主要取决于多址方式。而在低层，频谱共享主要取决于链路层协议，尤其是 MAC 子层的协议，以及它们如何映射到物理信道上。在网络层，重点是路由和服务质量。

本书主要涉及通信链路级的仿真，是指物理层和数据链路层的仿真，是时间驱动波形级仿真，即前面所讲的连续系统仿真，包括算法实现、电路级仿真和射频（RF）电路仿真。而网络层和传输层，主要是通信网络仿真所涉及的层次，要采用事件驱动仿真，即前面所讲的离散事件系统仿真。

1.2.3 仿真在通信系统设计中的作用

通信系统的性能可以用基于公式的计算方法，波形级仿真或通过硬件样机研究和测量来估计得到。基于公式的计算方法只适用于比较简单的可解析处理的通信系统，而硬件样机研究与测量则开销较大，且不够灵活。现代通信系统的迅猛发展使得系统越来越复杂，新技术不断出现，使得分析和设计系统的时间和开销也相应提高了，要做到短时、高效、省力地实现新技术的设计要求，使用强大的计算机辅助分析和设计工具是必不可少的。仿真已成为深入理解通信系统特性的有价值的工具，一个开发得好的仿真与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，可以很容易地做参数研究，观测到参数改变对系统性能的影响，可以很容易地产生直观的图形，如时域波形、信号谱图、眼图等。

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。通信系统设计过程开始于用户需求分析和性能期望，包括误码率或误比特率、中断概率，以及对带宽、功率、复杂度、成本和系统生存期等的约束。通信系统设计的整体目标是研究系统拓扑结构和参数值，以便同时满足性能指标和设计约束。设计的初始阶段涉及相当多的“艺术性”，通常由有通信系统设计经验的人来完成，多数情况下，只需在已成熟的类似系统基础上，做些小修改便可完成初始设计。

对于一般的通信系统，系统工程师要从系统初始配置、A 级指标和链路预算开始。系统初始配置包括系统结构、调制方式、多址技术、编码与抗多径干扰技术等。同时，也要确定一组叫 A 级指标的参数值，如功率级、带宽等。

对于个人蜂窝移动通信系统配置，人们已设计了三代移动通信空中接口标准，这些标准确定了移动通信系统的系统结构、调制方式、编码与各种抗多径干扰技术等。而对于蜂窝移动通信的运营商，则需要通过对实际传输环境进行链路预算，从而确定实际运营的各种参数，包括基站个数、位置等。

新通信系统的设计中几乎都包括一些信号处理新算法和新硬件技术。在设计的前期阶段，为了验证这些新算法和新硬件技术，仿真提供了极佳的环境。

1.2.4 通信系统仿真所涉及的领域

通信系统的仿真往往涉及较多的研究领域，包括通信原理、数字信号处理、概率论、信号检测与估计、随机过程理论、信号与系统理论、计算机科学和数论。掌握通信原理是通信系统仿真的关键，主要涉及系统结构、各种通信技术，如调制解调技术、多址技术及编码

技术等。而数字信号处理是用于开发构成通信系统仿真模型的算法，现代通信系统的许多新技术都涉及算法，如智能天线中的波束成形算法、均衡技术中的算法等。通信系统的性能指标通常以概率形式表示，如比特差错概率。在许多情况下，仿真要处理的信号和噪声均是随机过程中的一个样本，而且，对于无线信道的描述也需要随机过程理论。

1.3 仿真方法论

1.3.1 概述

从本质上讲，仿真方法论是很难系统化的，仿真具有艺术性和科学性两方面的技巧。但除最简单情况外，所有仿真问题都要涉及以下基本步骤^[7]：

- ① 将给定问题映射为仿真模型。
- ② 把整个问题分解为一组子问题。
- ③ 选择一套合适的建模、仿真和估计方法，并将其用于解决这些子问题。
- ④ 综合各子问题的解决结果以提供对整个问题的解决方案。

对整个通信系统的仿真是一个复杂的问题，往往需要把问题进行分层，不同层次的仿真，其方法与目的不同。可以把仿真分为四个层次：系统级仿真、子系统级仿真、元件级仿真和电路层仿真。越高层次的仿真，抽象越多，涉及的模型细节越少；越低层次的仿真，越与实际硬件相近，涉及的硬件细节和参数越多。对于电路层仿真，人们更多地使用硬件原型来进行验证和测试，在通信系统波形级仿真，很少涉及这一层次。

图 1-8 所示为一个通用的通信系统系统级模型，它包括 13 个功能模块，每个功能模块可视为一个子系统，可进一步分解。例如，以 TD-SCDMA 空中接口为例，其基带调制与脉冲成形器、射频调制器又可进一步分解，如图 1-9 所示。

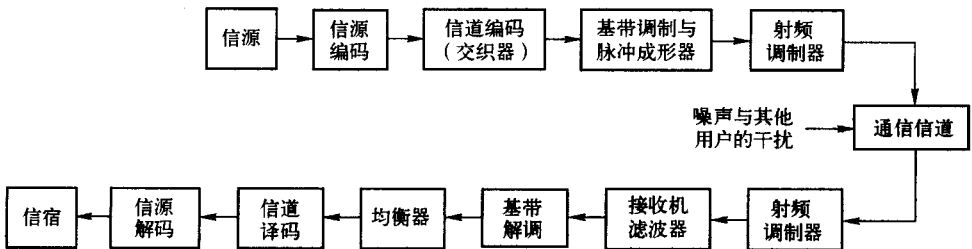


图 1-8 通信系统的系统级模型

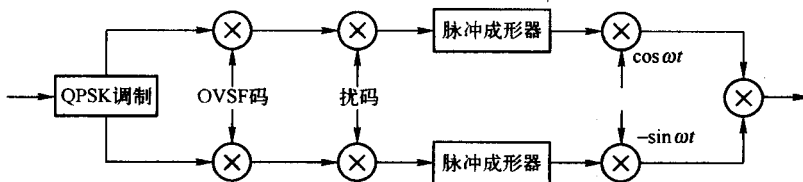


图 1-9 子系统模型

再进一步分解会产生“元件”级，甚至“电路”级模型。但在通信系统波形级仿真场