



# 无线电通信系统仿真 及军事应用

刘翠海 温东 姜波 李诤娜 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

014009034

TN92  
212

# 无线电通信系统仿真及 军事应用

刘翠海 温东 姜波 李詮娜 编著



国防工业出版社

·北京·



北航

C1697930

TN 92

212

014002034

## 内 容 简 介

本书系统全面地介绍了无线电通信系统仿真建模的基本理论和计算机仿真实现方法。全书共八章,包括通信系统仿真概述、通信系统仿真工具与应用、通信信号建模与仿真、调制解调技术仿真、纠错编码及同步仿真、无线通信信道建模与仿真、通信接收机建模与仿真、军事通信系统仿真实例等内容。

本书前七章根据通信系统的信号流程从发送端到接收端的顺序,逐一介绍了通信信源的产生、调制、编码、信道传输和接收等内容,体系结构合理,系统性强,层次分明。其中,为便于读者全面掌握通信系统仿真建模和实现方法,本书还提供了仿真实例和程序源码,有助于读者对通信系统仿真的深刻理解。

全书各章附有小结和习题,适合军事信息学专业和作战指挥学信息保障与对抗方向的“通信系统仿真及军事应用”课程教学使用,也可供有关专业的硕士研究生学习参考,对相关专业人员从事通信系统设计和实验也是有价值的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

无线电通信系统仿真及军事应用 / 刘翠海等编著.

—北京:国防工业出版社,2013.10

ISBN 978-7-118-09049-9

I. ①无... II. ①刘... III. ①无线电通信-通信系统-系统仿真-研究 ②军事通信-无线电通信-研究 IV. ①TN92 ②E962

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 222139 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787 × 1092 1/16 印张 17 字数 390 千字

2013 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 总定价 66.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540632

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

## 前 言

伴随着计算机的问世及其不断发展,计算机仿真在通信领域得到了广泛地应用。它不仅应用在复杂的通信系统设计与研发方面,而且已成为通信专业教学和学术研究的分析工具。“通信系统仿真及军事应用”就是为了更好地满足军事信息学科研究生的教学需要开设的课程,经过多年的教学实践,依据我院军事信息学科硕士研究生的人才培养方案,我们在对“通信系统仿真及军事应用”课程的教学内容体系进行优化、充实、更新和改革的基础上,编写了本教材。

“通信系统仿真及军事应用”课程是一门理论性与实践性较强的基础课程,是我院军事信息学和作战指挥学专业硕士研究生的选修课程。它将军事通信系统所涉及的通信基础知识与计算机仿真技术相结合,目标是为准确分析与科学评估军事通信系统性能提供技术支持,着重培养学员借助计算机仿真工具分析解决有关通信实际问题的能力。为此,本教材内容涵盖了计算机仿真基础、无线电通信系统的仿真建模和军事应用实例三部分内容。本教材共八章。第一章介绍了通信系统仿真的基本概念和方法、军事通信系统仿真的内容及发展;由于全书使用了 Matlab 来阐明概念和仿真示例,所以,在第二章首先简要介绍了 Matlab 基本内容,随后讨论了通信系统仿真的一般方法;第三章围绕通信信号生成、处理与仿真实现的主题讨论了通信系统仿真常用的基础知识;之后,根据通信系统的信号流程从发端到收端的顺序,将涉及到的通信信源的产生、调制、编码、信道传输和接收等内容分别在第四章至第七章予以介绍;第八章给出了两个军事通信系统的仿真实例,包括广泛应用于低截获通信的直接序列扩频通信仿真和战术数据链通信系统仿真,力求使读者通过实例掌握各个独立知识点在综合仿真系统应用中的使用方法与技巧。

书中除介绍了无线电通信系统基础知识及仿真实现方法等内容外,还提供了大量的基于 Matlab 实现的程序源码,这些源码不仅有助于读者对通信系统的深刻理解,而且还有助于读者深入思考仿真模型如何向工程实现转化。为了方便说明问题,本书所提供的仿真程序源代码并没有优化,在实际应用中,读者还需要针对如实时性要求、数值精度要求等具体问题优化算法和程序源码。

在本书中我们尽量摒弃繁琐的数学计算和理论推导,不加证明地给出数学模型结论,因为这样的证明在大多数有关通信系统方面的教科书中都会给出。本教材的特点是力求用通俗的语言,配以必要的图、表和程序源码等,阐明比较深奥的通信系统的仿真建模和仿真实现方法。这不仅会对军事信息学专业硕士研究生有所启迪,而且会对非通信专业且对通信仿真需要有所了解的研究生(如作战指挥学信息保障与对抗方向)有所帮助,这也是本书区别于以往同类教材的重要方面。

此外,复杂电磁环境下的军事指挥对军事通信提出了更高的要求,复杂电磁环境对不

同频段的无线电通信有不同的影响。鉴于此,本教材在第六章介绍了军事通信常用的长波、短波、超短波等不同波段的信道模型,对不同波段电波传播的基本概念、基本现象、数学模型及其仿真建模进行了全面分析。这部分内容可以应用于通信系统性能评估、军事通信装备战术分析等方面,也可以帮助那些想建立模型又苦于无从下手的读者直接开发使用。

本教材由海军潜艇学院训练部副部长王永生教授担任主审,导航系统教研室杨晓东教授、水声中心程玉胜教授和通信教研室温东副教授参加了部分书稿审稿工作。他们对本教材内容提出了宝贵的修改意见,在此,谨向他们表示衷心的感谢。此外,军事信息学硕士研究生学员李玉昌、杨晓舟和谭漫华同志参加了本书的校对工作,在此一并表示感谢。

本教材由刘翠海副教授担任主编并主笔第一章至第八章,其中第三章第一、二、三节由温东副教授编写,第二章第一、二节由李诤娜讲师编写,第七章第一、二节及第八章第一节由姜波博士编写。在本教材的编写过程中,参阅了许多著述、教材和其他文献资料。在此,谨向这些著述的原作者表示诚挚的谢意。

通信系统仿真涉及的知识面非常广,包括了通信原理、概率论、数字信号处理、随机过程、估计理论和程序设计等,由于受作者水平的限制,书中难免存在一些疏漏和不足,敬请读者批评指正。

编者

2013年8月

# 目 录

第一章 绪论 .....	1
第一节 引言 .....	1
第二节 通信系统仿真主要内容 .....	2
一、通信系统模型 .....	2
二、通信系统仿真建模的主要内容 .....	3
三、仿真模型使用 .....	4
第三节 通信系统仿真方法 .....	5
一、系统仿真方法 .....	5
二、通信系统建模原则 .....	5
三、通信系统性能估计 .....	7
四、仿真过程中的误差控制 .....	8
第四节 通信系统仿真的军事应用 .....	8
一、通信系统仿真的军事应用范畴 .....	9
二、军事通信系统仿真现状及发展 .....	10
小结 .....	11
思考题 .....	11
第二章 通信系统仿真工具与应用 .....	12
第一节 通信系统仿真常用工具概述 .....	12
一、Matlab 软件包 .....	12
二、OPNET 软件包 .....	12
三、SystemVue 软件包 .....	13
第二节 Matlab 仿真工具 .....	14
一、Matlab 工具特点 .....	14
二、Matlab 基本操作 .....	15
第三节 通信系统的蒙特卡罗仿真 .....	26
一、蒙特卡罗仿真 .....	26
二、AWGN 信道 .....	28
三、通信系统的蒙特卡罗仿真实例 .....	30
小结 .....	32
习题 .....	33

<b>第三章 通信信号建模与仿真</b> .....	34
<b>第一节 通信信号模型及仿真实现</b> .....	34
一、基本信号的数学表示及仿真 .....	34
二、基带信号的仿真表示 .....	38
三、带通信号的低通等效模型及仿真 .....	39
<b>第二节 随机过程模型及仿真</b> .....	41
一、通信系统中的随机现象 .....	41
二、随机过程模型 .....	42
三、随机过程的计算机仿真 .....	45
<b>第三节 通信信号参数估计</b> .....	54
一、参数估计的基本概念 .....	54
二、参数估计的一般方法 .....	55
<b>第四节 通信信号基本处理方法及仿真</b> .....	58
一、傅里叶变换及仿真实现 .....	58
二、滤波器模型及仿真实现 .....	62
三、自适应滤波及仿真实现 .....	75
<b>小结</b> .....	79
<b>习题</b> .....	79
<b>附录 Matlab 程序</b> .....	81
<b>第四章 调制解调技术仿真</b> .....	88
<b>第一节 概述</b> .....	88
一、调制解调的基本功能 .....	88
二、调制解调的分类 .....	89
<b>第二节 模拟调制解调仿真实现</b> .....	89
一、常规幅度调制解调仿真方案及实现 .....	89
二、载波抑制双边带幅度调制解调及仿真 .....	94
三、单边带幅度调制解调及仿真 .....	96
四、频率调制解调仿真方案及实现 .....	98
<b>第三节 数字幅度调制解调仿真实现</b> .....	101
一、BASK 调制解调仿真方案及实现 .....	102
二、MASK 调制解调仿真实现 .....	105
三、QAM 调制解调仿真方案及实现 .....	107
<b>第四节 数字频率调制解调仿真实现</b> .....	112
一、BFSK 调制解调方式仿真实现 .....	113
二、MSK 调制解调仿真方案及实现 .....	114
<b>第五节 数字相位调制解调仿真实现</b> .....	120
一、BPSK 调制解调仿真模型及实现 .....	120
二、QPSK 调制解调仿真方案及实现 .....	121
三、OQPSK 调制解调仿真方案及实现 .....	126

小结.....	127
习题.....	128
附录 Matlab 程序.....	129
<b>第五章 纠错编码及同步仿真 .....</b>	<b>136</b>
<b>第一节 线性分组码原理与仿真.....</b>	<b>136</b>
一、线性分组码原理 .....	136
二、汉明码模型及仿真实现 .....	138
<b>第二节 RS 码模型与仿真 .....</b>	<b>141</b>
一、RS 码数学模型 .....	141
二、RS 码算法的编程实现 .....	148
<b>第三节 卷积码模型与仿真.....</b>	<b>156</b>
一、卷积码编码模型及编程实现 .....	156
二、卷积码译码模型及编程实现 .....	160
<b>第四节 载波同步仿真实现方法.....</b>	<b>164</b>
一、载波同步问题 .....	164
二、载波同步模型及仿真实现 .....	165
<b>第五节 位同步与帧同步仿真实现方法.....</b>	<b>170</b>
一、位同步模型及仿真实现 .....	170
二、帧同步模型及仿真实现 .....	173
小结.....	175
习题.....	176
<b>第六章 无线通信信道建模与仿真 .....</b>	<b>178</b>
<b>第一节 概述.....</b>	<b>178</b>
<b>第二节 无线信道电波传播模型.....</b>	<b>179</b>
一、自由空间电波传播模型 .....	179
二、大尺度衰落模型 .....	180
三、小尺度衰落模型 .....	183
<b>第三节 短波信道传播特性及建模.....</b>	<b>188</b>
一、短波电波传播特性 .....	188
二、短波信道模型 .....	190
<b>第四节 长波通信信道特性及建模.....</b>	<b>195</b>
一、长波电波传播特性 .....	195
二、大气噪声仿真模型 .....	198
<b>第五节 无线通信信道仿真实现.....</b>	<b>200</b>
一、基于 Matlab 的瑞利衰落信道仿真实现 .....	201
二、基于 Watterson 模型的短波信道仿真实现 .....	203
三、Hata 模型的仿真实现 .....	210
小结.....	212
习题.....	212



第七章 通信接收机建模与仿真 .....	214
第一节 概述 .....	214
第二节 最佳接收机模型与仿真实现 .....	215
一、最佳接收机统计模型 .....	215
二、匹配滤波接收机与相关接收机模型及仿真 .....	220
三、最佳接收机计算机仿真 .....	225
第三节 Rake 接收机建模与仿真 .....	230
一、分集技术概念和分类 .....	230
二、Rake 接收机模型及仿真实现 .....	231
小结 .....	236
习题 .....	237
第八章 军事通信系统仿真实例 .....	239
第一节 低截获扩频通信系统仿真 .....	239
一、概述 .....	239
二、直接序列扩频系统的蒙特卡罗仿真 .....	241
三、计算机仿真实现 .....	243
第二节 战术数据链通信系统仿真 .....	247
一、概述 .....	248
二、战术数据链通信系统基本工作原理 .....	248
三、系统仿真方案 .....	251
四、计算机仿真实现 .....	254
小结 .....	261
习题 .....	261
参考文献 .....	262

# 第一章 绪 论

近些年来应用于通信和信号处理系统的各种新技术蓬勃发展,致使通信和信号处理系统越来越复杂。在对如此复杂的通信系统进行分析和评估时,通常难以建立有效的分析环境。通信系统仿真技术的出现,为有效而又逼真地研究、分析、评估现代通信系统提供了可能。

为了便于理解无线电通信系统仿真及其实现方法以及仿真在军事通信系统中的应用等内容,本章将简要介绍通信系统的基本组成,分析与研究通信系统性能的基本方法,以及建模与仿真在军事通信上的应用。

## 第一节 引 言

仿真是指建立研究对象的模型,并在此模型的基础上对真实系统的某些方面进行实验和研究,从而获得分析问题和解决问题的方法,是一种基于模型的活动。根据模型种类的不同,仿真可分为物理仿真、计算机仿真和半实物仿真。

伴随着计算机的问世及其不断发展,计算机仿真已经成为了广泛应用的系统分析方法。它的应用领域不仅扩展到民用商品的设计开发,而且在军事领域也有着广泛的应用,表现在利用仿真不仅可以论证武器装备,研究武器系统的作战效能、可靠性、易损性和生存能力,而且利用仿真还可以研究作战。在 20 世纪 90 年代初期海湾战争打响之前,美军就利用建立的战场态势模型进行了作战仿真,仿真结果表明,延长空袭行动可有效消灭伊军有生力量的 30% ~ 50%,同时美军地面战斗伤亡可从 4 万人降到 5 千人,时间周期为一周左右。该仿真结果为美军海湾战争作战方案制定提供了重要的依据。

在人类进入信息社会的今天,人们的一切活动几乎都离不开信息,信息的传递与交换需求催生了通信系统。目前,信号处理技术与计算机技术的迅猛发展及其在通信系统中的应用,使得现代通信系统越来越复杂,特别是近年来军事通信系统发生了巨大的变化,正朝着技术复杂化、功能综合化、网系一体化方向发展。在对规模如此庞大的通信系统进行分析和性能评价时,计算机仿真则是行之有效的手段。

所谓通信系统的计算机仿真就是利用计算机对实际通信系统的物理模型或数学模型进行实验,通过这样的模型实验来对一个实际系统的性能和工作状态进行分析和研究。当在实际通信系统中进行实验研究比较困难或根本无法实现时,仿真就成为了有效的方法。如要测试某种调制方式在时变多径无线信道中的性能表现,通常只能通过建立时变多径无线信道的数学模型,利用计算机来实现仿真的无线信道,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,实际系统还停留在图纸阶段,若要分析其性能只能采用仿真的方法;再如对长波通信系统进行性能分析时,考虑到长波台庞大的天线设备和位于水下潜艇内的收信设备进行一次通信的代价

较大,计算机仿真方法由于其廉价性、高效性和灵活性成为分析系统性能的有效手段之一。

## 第二节 通信系统仿真主要内容

通信系统仿真是以通信系统为对象建立模型,利用计算机对模型进行运算以达到模拟实际通信系统的目的。由此定义可以看出,通信系统仿真主要包括两部分内容:一是通信系统的模型构造;二是通信系统模型的使用和执行。本书是以无线电通信系统为仿真对象,对于无线电通信系统常涉及到的调制与解调、信号在无线信道中传输和信号接收等均是仿真建模的主要内容。

### 一、通信系统模型

通常将实现信息传输的系统称为通信系统,图 1-2-1 给出了一个通信系统的基本组成。在通信系统中,一般要进行两种变换与反变换。在发送端,第一个变换是输入变换器,它把要传输的信号变成电信号,该信号一般是低频的,而且包括零频附近的分量,通常把该信号称为基带信号。第二个变换是把基带信号变成为适合在信道中传输的信号形式,并送入信道,该变换一般称为调制。在接收端,接收机和发射机的功能相反,它从信道中选取接收信号的已调波并将其变为基带信号,该变换称为解调。输出变换器再把解调后的基带信号变换为相应的信息。



图 1-2-1 通信系统基本组成

通信系统类型很多,按照不同的分类方法,有着不同的名称,不同的应用场合会采用不同的通信技术,但对于所有通信系统其实质是一样的,都是把发送端的信息通过某一信道传递到接收端。

一般而言,人们习惯将通信系统划分为模拟通信系统和数字通信系统,前者信道中传输的是模拟信号,后者信道中传输的是数字信号。对于模拟通信系统仿真来说,即使其真实系统传输的是模拟电信号,但是在计算机仿真中,仍须对其离散数字化,因此,从计算机仿真的角度,模拟通信系统的仿真处理与数字通信系统仿真区别不大。

由于现代通信系统结构越来越复杂,若对其进行完整仿真是很困难的。因此,可以通过简化问题的方法来降低系统的复杂度,将系统以模块化的形式表示,然后,针对其中各个模块分别进行建模。这一方法不管是在设计仿真还是在系统性能评估中均得以应用。图 1-2-2 是在通信系统基本组成基础上建立的通信系统的系统级模型。系统级模型是一种拓扑结构,其仿真框图与真实系统越接近,整个仿真系统的精确度就越高。

图 1-2-2 所示的系统级模型比图 1-2-1 更加具体,它包括了信源、编码器、译码

器、调制器、解调器、滤波器和信道等功能模块。如果仿真的目的是系统设计,则需要对每个功能模块进一步细化,甚至细化到电路级模型或元件级模型。通常在与仿真目的一致的前提下,应该尽可能用较高抽象程度的模型进行仿真,这样可以减少计算量,降低复杂度。同样,如果仿真的目的是系统性能评估,则应该看是对整体还是对某一模块的性能进行评估。也就是关注哪一部分的性能,就应该对其进行详细的描述,在不影响整体性能的前提下,其他模块的模型尽量简化。

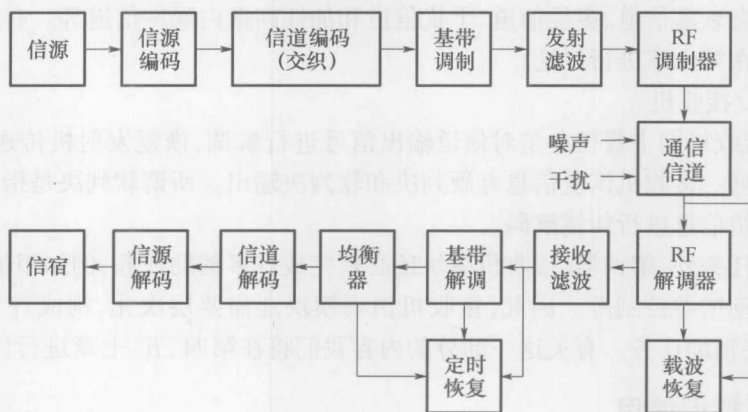


图 1-2-2 通信系统的系统级模型

## 二、通信系统仿真建模的主要内容

按照第一节介绍的内容可知,通信系统仿真的目的不同,人们关注的功能模块也不尽相同。图 1-2-2 所示的通信系统的系统级模型,概括起来包括了信号源、调制器、发射机、信道、解调器和接收机,这些内容的建模及仿真将是全书后续章节全面介绍的主要内容。

### 1. 信号源

信号源可以是通信系统仿真的起点,也可以是某仿真子系统的中继,或者是系统仿真中需要的噪声和干扰。在本书中若没有特别声明,信号源是指模拟信息源或数字信息源。本书讨论的重点是数字传输系统,虽然在第四章第二节介绍了模拟调制解调仿真,但是在仿真中,我们是将一个模拟信息源转换为一个等价的数字信息源<sup>①</sup>,所以书中采用的是数字信息源。有关这一部分的内容我们将在第三章进行讨论。

### 2. 调制器/发射机

调制器/发射机的任务是将信号源产生的信号变换成适合在信道中传输的仿真波形,每隔  $T_c$  秒,信号源向发射机发送一个数字值,每隔  $T_c$  秒,发射机产生一个仿真符号。因此,  $T_c$  是基本信号周期,其倒数为信号速率,也称为波特率。

根据改变载波不同的参数,调制可以分为幅度调制、频率调制和相位调制。有关这一部分的内容我们将在第四章进行讨论。

<sup>①</sup> 转换的过程实际上就是模数转换和信源编码的过程,书中作了省略。

### 3. 信道

传输信道提供了信号源和收信者之间的连接通路。关于传输信道有多种定义:第一种定义为传输信道是实现两地之间信号传输的真实物理介质;第二种定义为传输信道是通信系统中不能人为改变的部分;第三种定义为传输信道是通信系统中限制传输速率和传输质量的部分。不管传输信道为哪一种定义,本书采取的原则是把影响系统性能的又不能人为控制的所有因素都归入信道,例如衰落和热噪声。

信道类型有衰落信道、多径信道、干扰信道和加性高斯白噪声信道等。有关这一部分的内容我们将在第六章进行讨论。

### 4. 解调器/接收机

解调器/接收机的主要任务是对信道输出信号进行解调,恢复发射机传送的信息,并产生估计值序列。接收机恢复信息有硬判决和软判决输出。所谓软判决是指利用信号编码中加入的纠错信息进行纠错解码。

除了主要任务外,解调器/接收机模块还必须完成许多辅助任务,例如相位跟踪/频率跟踪、同步、自动增益控制等。因此,接收机仿真模块还需要层次化,构成许多子系统模块,以完成这些辅助任务。有关这一部分的内容我们将在第四、五、七章进行讨论。

## 三、仿真模型使用

在对仿真对象深入了解和分析的基础上,需要对仿真对象各部分的相互关系进行描述,即模型构造,这也是系统仿真的基础。当模型开发出来之后,系统仿真的另一内容就是对仿真模型的编程实现、仿真系统的运行和分析。

模型编程就是编制模型软件。在模型编程的每一阶段,都要对模型进行验证,检验模型的正确性。模型编程一般是从搞清楚软件的目的入手,然后逐步细化到如何进行。也就是采用什么方法,利用什么手段,模块如何划分等。

一旦上述情形确定之后,即可进入编程实现阶段。编程过程中应遵循软件工程模块化或面向对象的思想,各模块独立测试。当程序被开发出来,并且确认它是对仿真系统的一个合理表示,即可进行运行阶段。

运行阶段包含了一系列的参数仿真运行,进行参数仿真运行的目的就是达到了仿真研究的目标。每一次仿真运行都是一次重复,可以简称为“运行”。每一次仿真运行都能产生一系列“样本”或一系列“观测值”。每一个样本都是某个模型变量在仿真期间某节点的值。为了测试不同的假设,为了包括输入变量的各种组合,常常要进行多次仿真运行。为了增加仿真结果的可信度也需要进行多次仿真运行。读者通过本书第八章军事通信系统仿真实例能够领会到这个问题。

通过实验所得到的结论应该用有效的统计理论作指导,即验证该实验值的可信度。因为,对于每一个实验值,总是存在着一定程度的怀疑。虽然使用统计理论不会消除这种怀疑,但是它可以使我们能够量化结果的可信度。

在仿真运行产生结果后,就可以利用仿真结果进行分析得出结论。结论应该反映建模初期建立的仿真目标,也应该以可信度区间的形式给所有重要的输出变量提供量化支持。此外,如果被仿真的系统正在开发之中,随着真实系统的建立和完善,有关数据的定义应更加明确、数值更加准确,模型的预测值应该能和系统行为的测量值相比较。当前结

果也可以与早期的、不怎么精确的模型的运行结果进行比较,查看附加的精度是否仍然导致相同的判定,从而使模型能随着系统定义的明确而得到增强和完善。

### 第三节 通信系统仿真方法

通信系统的复杂性决定了通信系统仿真建模的困难,因此实现通信系统的计算机仿真涉及了一定的方法和原则。本节讨论了通信系统仿真的一般方法和计算机仿真时须遵循的一般性原则。

#### 一、系统仿真方法

为了说明通信系统仿真的一般方法,图1-3-1给出了一个具体通信系统的简化模型。若考虑该系统的误码率性能只与滤波器参数、非线性放大器参数以及信噪比之间的函数关系有关,那么,其他不感兴趣的部分可简化,感兴趣的部分可在模型的基础上进一步细化。

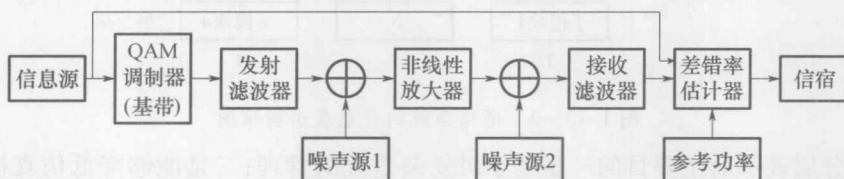


图 1-3-1 通信系统仿真简化模型

图 1-3-1 中由于滤波器及非线性的存在,定量分析评估该系统的性能是很困难的。带宽受限的滤波器会引入码间干扰(ISI),而噪声经过非线性单元会导致非高斯和非加性现象,这些都是很难描述和分析的。当然可以做些近似,如忽略非线性单元前的滤波器的影响,将两个噪声源合并,并将这两个噪声源的总效应当作加性、高斯噪声源处理。这样的简化对于得到系统性能的初步评估是有用的,但对于进行详细的性能分析则不够准确。若要使系统仿真的结果与实际情况一致,仿真的模型就应尽可能详细,当然,这也会使仿真占用的资源和耗费的时间与精力随之增加。如何在模型复杂性与仿真的准确性之间找到合适的平衡和折中将是实现仿真时需要注意的。

从上述分析可以看出通信系统仿真一般经历三个阶段。首先是对通信系统建模,需要对模型进行初始描述;待建模完成后,完善仿真系统所需的各种输入数据,随后进入全面仿真阶段;最后,对仿真输出的各种数据结果进行分析和可信度检验,从而得到待仿真通信系统的各种性能指标。

#### 二、通信系统建模原则

如何根据实际通信系统的技术要求建立一个有效的仿真模型,是通信系统仿真成败的关键,也是系统仿真中最难的步骤之一,因为模型的好坏决定了系统仿真运行所需要的时间和仿真结果的精度。但是,系统仿真结果的精度和仿真运行时间之间是一对矛盾体。模型的准确性越高,描述得越详细,系统仿真运行所需要的时间则越长,耗费的各种计算资源越多。另一方面,即使不考虑仿真运行时间和计算资源,由于实际的通信系统通常太过复杂,也无法对其整体进行准确的建模和仿真,因此,通信系统建模一般遵循“分层表示”、“模块

化设计”和“简化运算”的建模原则,既达到了仿真目的,也降低了问题的复杂度。

### 1. 分层表示

通信系统的实际设计过程大多是遵循自顶向下的设计方法。在设计过程中,一般会将整个系统按照功能划分为多个子系统,如图 1-2-2 所示的系统级模型,按照功能模块可以划分成 16 个子系统。每个子系统根据需要还可以进一步细分,这种层层推进的形式,就是系统的分层表示。分层表示可以表示成一个树状图,这个树状图具有按层次逐层分支的结构,如图 1-3-2 所示。

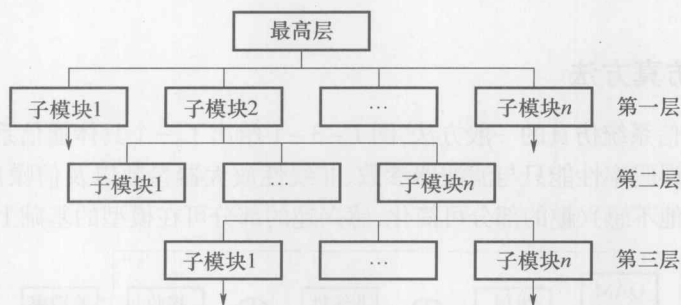


图 1-3-2 通信系统的分层表示树状图

采用分层表示的主要目的一是利于对复杂系统的管理;二是能够降低仿真模型的复杂度,并可降低与仿真模型相关的计算量。通常在能够达到仿真目的的条件下,应该尽可能采用较高层次的模型进行仿真,而不必将模型进一步分层;如果真的需要,哪怕分解到元器件一级也是必要的。分层表示除了能够降低复杂度和所需要的仿真时间外,越高一层模型将具有越少的参数且易于验证,越少的参数意味着模型能用越少的指标来刻画。例如图 1-3-2 中每一模块一定会执行与其相关的指令,因此仿真中尽量采用较高层来完成,除非迫不得已。

假设第一层子模块 1 指的是滤波器模型,如果此次仿真目的并不是为了验证系统采用了哪一种新型滤波器的性能,那么,在此给出滤波器的传递系数即可,不需要将此模块进一步分层为电路级仿真或比特级仿真。此例中高一层模型对信号的作用和低层次模型对信号的作用,结果是一致的,不会影响整个系统性能,同时,降低了系统仿真的复杂度,减少了计算量。

### 2. 模块化设计

分层表示是自上而下的树状结构,它将系统“垂直分割”成不同的子系统。模块化设计则是将某一个子系统中的一个复杂问题分解为一组相互关联但独立的问题的方法。该方法是一项有利于降低复杂度和计算量的方法。分解后的各个独立的问题单独解决然后再联合起来处理,这与 Windows 操作系统中的动态链接库(DLL)有些相似之处。

例如,在一个通信系统中往往会有多个模块涉及到同步功能,在仿真中,可能存在几种不同的模型,所有模型都在不同的分层上模拟了同步功能,因此,模块化设计则可以将其视作同一模块。

### 3. 简化运算

根据我们关注问题的角度不同,可以忽略部分不必要的细节或使用近似方法和联合

模型的简化方法来降低整个系统或模型的复杂度。例如,在仿真系统设计过程中,如果假设信道是缓慢时变的,且系统运行在高信噪比下,可合理地预计同步差错很小,因而在性能估计时同步的影响可以忽略不计。在这种情况下,无需仿真时钟恢复和载波恢复部分,并可将其从方框图中删去。

此外,我们在对实际通信系统接收到的信号进行观察时,当观察时间足够长且输入信号动态范围足够大时,大多数情况系统会表现出时变和非线性,但在短时间段和低信号电平的情况下,我们可以由线性时不变模型近似。通常非线性模型分析起来非常复杂,因此,我们会用线性系统的原理来简化计算。

### 三、通信系统性能估计

通信系统是用来将携带信息的波形传送给接收方。那么设计通信系统时,可以选择不同的波形来携带信息。例如,选择什么样的波形来表示字母 A 呢? 这取决于很多种因素,其中包括波形的带宽(频带宽度)和波形的中心频率、波形的功率或能量、噪声对波形携带的信息的影响,以及发射端产生波形和接收端检测波形的成本等。这些都可以在设计之初通过系统仿真来进行评估。

通信系统性能估计是仿真的主要目标之一。对于模拟通信系统,主要性能指标是输出信噪比;对于数字通信系统,则是误比特率或帧差错率,信噪比也是数字通信系统中一个重要的性能指标。

例如图 1-3-3 所示的基带数字传输通信系统仿真模型,仔细观察会发现它与前面介绍过的通信系统模型有所区别。在图 1-3-3 所示的模型中,“比较”和“差错计数”两个模块是实际通信系统模型中所没有的。这两个模块具有明显的功能,即接收符号与原始数据符号相比较以确定差错计数。模型中误比特率的计算可以通过改变不同的参数对系统性能进行评估,一是噪声或者干扰信号的功率或能量;二是信道环境(如多普勒频移);三是携带有信息的信号功率或接收端接收到信号的功率或能量。由这些参数可以对系统的误码率、信噪比、接收机灵敏度、均方误差、频率稳定性和系统鲁棒性等系统性能指标进行评估。后面章节中我们讨论的重点都是围绕着这些指标来进行的。

图 1-3-3 确定误比特率的方法称为蒙特卡罗估计,有关通信系统的蒙特卡罗仿真方法将在第二章详细讨论。

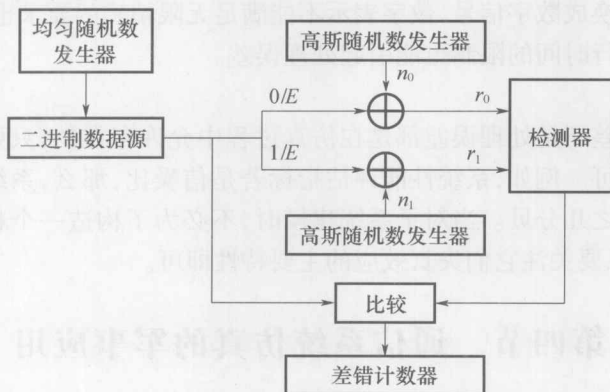


图 1-3-3 基带数字传输通信系统仿真模型



## 四、仿真过程中的误差控制

对一个通信系统性能评估或模型验证是否准确与我们在仿真中引入的误差有关。仿真中引起误差的原因有很多,经分析归类,一是建模误差;二是处理误差;三是估值误差。前面曾提到,为了简化模型和计算量,可以忽略部分细节作近似设计或运算,这种近似结果会带来仿真中的建模误差。此外,由于计算工具计算精度的限制也会带来仿真中的处理误差。以上两种误差都是能够观察到的,但是,当我们对系统性能进行评估时,有些性能指标是估计得到的,这些估值多是近似值。

### 1. 建模误差

建模误差包括系统建模误差、设备建模误差和随机过程建模误差。系统模型通常是以框图形式表示,其仿真框图若是与实际系统的拓扑结构图完全吻合,那么整个仿真系统就不会出现系统建模误差,但是往往仿真方框图不能准确地反映实际系统,系统建模误差因此产生。引起的原因主要有:一是为了降低复杂度而简化实际系统框图,这种做法虽然减小了运算量,但因此也产生了系统建模误差;二是由于仿真中对某些失真较小的元件予以忽略而产生的。例如低功率放大器、电磁连接器等元件不影响信号的形状,并且在大多数情况下,它们影响很小,因此将其忽略。

设备建模误差是由于一个设备模型不能完全反映设备本身而引起的。假如我们观察一下实际的滤波器和仿真的滤波器输出,就可以得出引起设备建模误差的原因:一是由于在对滤波器进行物理测量时,其测量结果本身就不完全准确,因此,仿真模型与真实特性之间就产生了差异;二是由于滤波器本身特性也不是固定不变的,器件老化或工作环境发生变化都会引起设备建模误差。

在通信系统仿真过程中,除了要对一些性能已经确定的设备进行建模以外,系统中的一些非确定性因素还需要考虑,比如像无线信道的噪声影响和设备自身的热噪声影响等。在仿真中,这些影响通常是以随机过程模型表示。由于随机过程模型不能完全仿真实际过程的性能,因此产生了随机过程建模误差。

### 2. 处理误差

无论进行何种方式的仿真,都会存在处理误差,处理误差是仿真固有的本质。例如计算机仿真,其计算精度、运行速率以及计算机存储的局限性会引起处理误差。此外,对模拟信号进行采样转换成数字信号,数字表示不能满足无限精确的要求也会导致处理误差。再有就是计算机运行时间的限制也能引起处理误差。

### 3. 误差控制

无论是建模误差还是处理误差都是在仿真过程中允许存在的,只要我们将误差值控制在允许范围内即可。例如,系统性能评估指标若是信噪比,那么,系统建模时其信噪比最终应不超过十分之几分贝。当对子系统建模时,不必为了构造一个精确的模型而特别关注其细节特征,只要关注它们失真效应的主要特性即可。

## 第四节 通信系统仿真的军事应用

一般来讲,军事通信系统与民用通信系统的技术基础是相同的,在各类军用和民用系