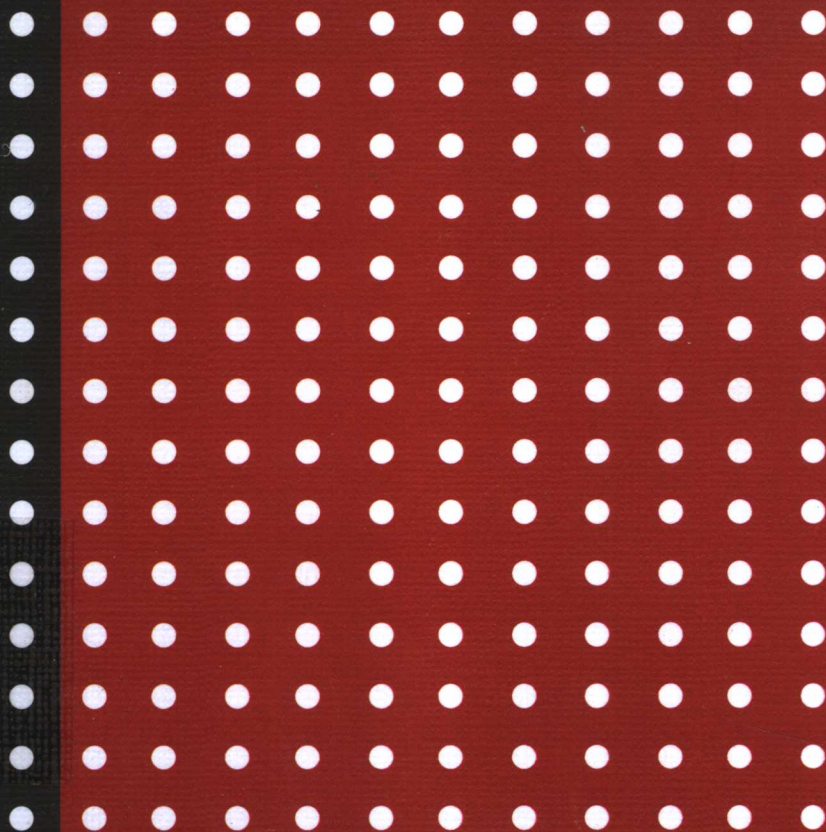


21 世纪高等学校电子信息工程型规划教材

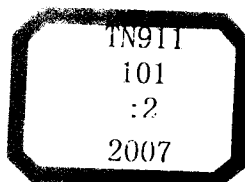
现代通信原理(下册)

——信息传输的相关技术

余小清 赵恒凯 李颖洁 邹雪妹 编著
郑国莘 主审



清华大学出版社

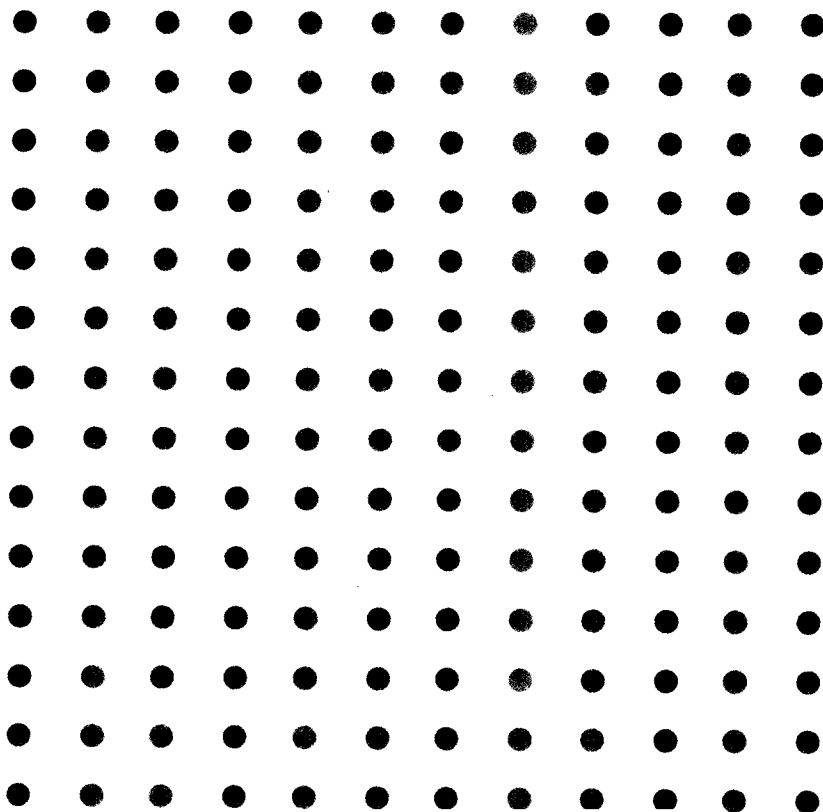


21 世纪高等学校电子信息工程型规划教材

现代通信原理(下册) ——信息传输的相关技术

余小清 赵恒凯 李颖洁 邹雪妹 编著

郑国莘 主审



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

现代通信原理共上、下两册,本书是下册,主要介绍通信相关的主要技术问题,包括涉及到的理论、系统实现方法以及性能分析等。

本书共6章,内容包括数字信号的最佳接收、同步原理、信源编码和信道编码、先进的数字通信技术和通信网概论等。第8章介绍数字信号的最佳接收问题;第9章介绍通信系统中主要的同步理论及其系统实现;第10章讲解信源编码的原理和实现方法;第11章则着重于信道编码的有关理论和方法;第12章讨论了目前几种先进的数字通信技术,包括交换技术、扩频通信、OFDM技术以及多址技术;第13章是通信网的概论,具体讲述了通信网的理论基础以及三种重要的通信网(电话通信网、数据通信网和移动通信网),最后对下一代网络(NGN)进行了展望。每章后面有思考题和习题。

本书可作为通信及信息类专业课教材,适合于短学期制的教学使用,上、下两册合并则可作为长学期的教学使用。本书也可供从事通信、电子工程、自动化等科研工程技术人员作为专业参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

现代通信原理(下册)——信息传输的相关技术/余小清等编著. —北京:清华大学出版社, 2007.5

(21世纪高等学校电子信息工程型规划教材)

ISBN 978-7-302-13778-8

I. 现… II. 余… III. ①通信理论—高等学校—教材 ②信息传输—高等学校—教材
IV. ①TN911 ②TN919.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第106645号

责任编辑:魏江江

责任校对:白蕾

责任印制:何芊

出版发行:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦A座

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社总机:010-62770175 邮购热线:010-62786544

投稿咨询:010-62772015 客户服务:010-62776969

印装者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:12.75 字 数:286千字

版 次:2007年5月第1版 印 次:2007年5月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:17.00元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:016100-01

出版说明

随着我国高等教育规模的扩大和产业结构调整的进一步完善,社会对高层次应用型人才的需求将更加迫切。各地高校紧密结合地方经济建设发展需要,科学运用市场调节机制,合理调整和配置教育资源,在改革和改造传统学科专业的基础上,加强工程型和应用型学科专业建设,积极设置主要面向地方支柱产业、高新技术产业、服务业的工程型和应用型学科专业,积极为地方经济建设输送各类应用型人才。各高校加大了使用信息科学等现代科学技术提升、改造传统学科专业的力度,从而实现传统学科专业向工程型和应用型学科专业的发展与转变。在发挥传统学科专业师资力量强、办学经验丰富、教学资源充裕等优势的同时,不断更新其教学内容、改革课程体系,使工程型和应用型学科专业教育与经济建设相适应。

为了配合高校工程型和应用型学科专业的建设和发展,急需出版一批内容新、体系新、方法新、手段新的高水平电子信息类专业课程教材。目前,工程型和应用型学科专业电子信息类专业课程教材的建设工作仍滞后于教学改革的实践,如现有的电子信息类专业教材中有不少内容陈旧(依然用传统专业电子信息教材代替工程型和应用型学科专业教材),重理论、轻实践,不能满足新的教学计划、课程设置的需要;一些课程的教材可供选择的品种太少;一些基础课的教材虽然品种较多,但低水平重复严重;有些教材内容庞杂,书越编越厚;专业课教材、教学辅助教材及教学参考书短缺,等等,都不利于学生能力的提高和素质的培养。为此,在教育部相关教学指导委员会专家的指导和建议下,清华大学出版社组织出版本系列教材,以满足工程型和应用型电子信息类专业课程教学的需要。本系列教材在规划过程中体现了如下一些基本原则和特点:

(1) 系列教材主要是电子信息学科基础课程教材,面向工程技术应用培养。本系列教材在内容上坚持基本理论适度,反映基本理论和原理的综合应用,强调工程实践和应用环节。电子信息学科历经了一个多世纪的发展,已经形成了一个完整、科学的理论体系,这些理论是这一领域技术发展的强大源泉,基于理论的技术创新、开发与应用显得更为重要。

(2) 系列教材体现了电子信息学科使用新的分析方法和手段解决工程实际问题。利用计算机强大功能和仿真设计软件,使得电子信息领域中大量复杂的理论计算、变换分析等变得快速简单。教材充分体现了利用计算机解决理论分析与解算实际工程电路的途径与方法。

(3) 系列教材体现了新技术、新器件的开发应用实践。电子信息产业中仪器、设备、产品都已使用高集成化的模块,且不仅仅由硬件来实现,而是大量使用软件和硬件相结合方法,使得产品性价比很高,如何使学生掌握这些先进的技术、创造性地开发应用新技术是本系列教材的一个重要特点。

(4) 以学生知识、能力、素质协调发展为宗旨,系列教材编写内容充分注意了学生创新

能力和实践能力的培养,加强了实验实践环节,各门课程均配有独立的实验课程和课程设计。

(5) 21 世纪是信息时代,学生获取知识可以是多种媒体形式和多种渠道的,而不再局限于课堂上,因而传授知识不再以教师为中心,以教材为惟一依托,而应该多为学生提供各类学习资料(如网络教材,CAI 课件,学习指导书等)。应创造一种新的学习环境(如讨论,自学,设计制作竞赛等),让学生成为学习主体。该系列教材以计算机、网络和实验室为载体,配有多种辅助学习资料,提高学生学习兴趣。

繁荣教材出版事业,提高教材质量的关键是教师。建立一支高水平的以老带新的教材编写队伍才能保证教材的编写质量和建设力度,希望有志于教材建设的教师能够加入到我们的编写队伍中来。

21 世纪高等学校电子信息工程型规划教材编委会

联系人: 魏江江 weijj@tup.tsinghua.edu.cn

前 言

随着通信工程学科的飞速发展,相关的通信理论、技术等也都获得了飞速的发展,并且其应用也越来越广泛。为适应这一发展需求,作为通信、电子类专业的专业基础课程,通信原理已经成为很多学校的指定选修课。通信原理的内容广泛、理论复杂,广大读者迫切需要一本适应学科发展和教学改革要求的高水平的教科书。本套教材正是朝着这个目标所作的努力和尝试。

本套教材共分上、下两册,全面介绍现代通信系统的基本原理、基本性能和分析方法以及现代通信系统中最新的相关技术。本套书将传统的通信原理讲授的内容大部分安排在了上册,把新的技术知识和部分加深的内容安排在下册。这样的安排一方面是从信息传输的角度很好地将原理和技术分开,更能保证知识的逻辑和连贯性;另外也便于读者了解通信原理课程的体系结构及内在联系,更方便组织教学。上册书主要讲述信息传输系统的基本原理。全书分为7章,包括绪论、预备知识、随机信号分析、模拟调制系统、模拟信号数字化和数字信号的基带传输和频带传输系统。下册书主要讲述信息传输的相关技术,分为6章,包括数字信号的最佳接收、同步原理、信源编码、信道编码、先进的通信技术和通信网概论。

在上册书中,第1章是本书的绪论,介绍了通信系统的基本知识,包括通信系统的组成、分类,信号与信息、信道与噪声等,为后续的学习奠定必要的基础。研究通信系统特性就必须掌握信号的相关理论知识,为了读者学习时可以方便地查阅到有关的基础知识,本书特别设置第2章介绍预备知识,其中涉及了信号的频谱分析、信号的能量和功率以及卷积和相关运算等重要的基础知识。通信系统的一个特性就是存在不确定性。这种不确定性一部分是由于系统中不可避免地存在着噪声,另一个主要原因是由于信息本身的不可预测性。因此对通信系统的分析需要使用概率与随机过程的分析方法。第3章着重介绍随机过程的分析方法及其在通信系统中的应用。这两章都是分析通信系统的基础。

从第4章开始进入通信系统原理的具体论述。模拟调制技术是学习调制原理的基础,所以在本书中仍然以一章的篇幅对其进行的介绍,但重点是对其性能的分析。数字通信是目前的主流方向,本书从模拟信号的数字化开始,共分三章详细介绍了数字信号的基带传输和频带传输原理,并在第7章的结尾对数字调制技术在现代通信中的改进和发展进行了论述,使读者可以在掌握了基本理论后对最新的进展有所了解。

在下册书中,重点放在了信息传输的相关技术领域。

由于信道特性的不理想以及信道中存在噪声等不利因素,都将直接作用到接收端,从而对信号接收产生影响,因此,对于一个通信系统的质量而言,接收系统的性能非常关键。下册书第8章以接收问题作为研究对象,着重分析从噪声中如何用最好的策略提取有用信号,即着重讨论数字信号最佳接收的基本原理以及基本方法。

无论是模拟通信系统或是数字通信系统,都要解决一个重要的实际问题——收发双方

的同步。同步问题关系到通信能否正常进行并直接影响通信质量的好坏。下册书第9章分别介绍了载波同步、位同步、群同步(帧同步)和网同步等理论知识。

下册书第10章和第11章分别介绍了信源编码和信道编码的有关内容。第10章首先介绍了编码的基本概念,然后介绍了无记忆信源等长编码、不等长编码的方法;阐述了无失真信源编码定理(即香农(Shannon)第一定理);最后给出最佳无失真信源编码的具体方法。第11章首先介绍了纠错编码的常用方法,接着论述了几种常用的简单信道编码、详细介绍了线性分组码、循环码、卷积码和Turbo码的有关原理的实现方法。

第12章选择了现代通信中几个常见的数字通信技术进行介绍,包括交换技术、扩频通信、正交频分复用(OFDM)技术和多址技术四部分内容。

最后第13章论述了有关通信网的基础知识,包括通信网的分类组成及功能、网络体系结构、传输协议以及几种专用通信网、电话网、数据网和移动通信网的基本概念和原理等。最后介绍了有关NGN的发展情况。

作为高等技术教育电子信息类通信及其相关专业的一门核心技术基础课教材,在本书的编写中遵循以下的原则。本书既介绍模拟通信,又介绍数字通信,但以数字通信为主。既讲述通信系统的基本知识和基本原理,又注重通信技术在实际系统中的应用,特别注意吸收新技术和新的通信系统。本书讲述力求简明透彻,重点突出。书中大量的数学推导和计算以小字体呈现,既不影响课堂的重点讲授,又方便读者参考阅读时的需要;教材的宏观体系是,先基础知识,后系统介绍;先模拟通信系统,后数字通信系统。先基本原理学习,后相关技术介绍。每章后设有思考题和习题,便于教师组织教学和学生自学。

本套书参考学时为80学时,上册、下册各占一半,非常适合短学期制的高校使用。选用本书作为教材可根据课程设置的具体情况、专业特点和教学要求的侧重点不同进行自由取舍,灵活讲授。如先修课已学过《高频电子线路》的,模拟调制系统一章可以少讲或不讲;教材中打*的章节或内容属加深、拓宽内容,可以不讲或少讲。

作者在编写本书和承担上海大学精品课程“通信原理”的教学过程中得到了学校教务处、通信与信息工程学院的关心和支持,教材的出版还受到了学校教材编写的资助,在此向他们表示衷心的感谢!在本书的编写过程中始终得到了通信学院副院长郑国莘教授、副院长陈泉林副教授的热情关心和支持,在本书出版之际,谨向两位教授致以诚挚的谢意。

此外,还有很多朋友和同学积极参与到了教材的资料搜集和整理活动中。上海电信的张智宏工程师和中兴通讯上海研究所的臧美燕工程师为本书下册的第12、13章编写了部分内容并提供了大量的资料。上海大学的石菁、郭利敏、王修远、顾晓辉、董欣、胡文潇、刘曾生、朱春妍、浦明煌、陈智琼等同学以及通2004级通信8班的全体同学为本书的资料搜集、电子版的排版等方面做了大量的工作,在此也向他们表示感谢。

本书既适于各类高校通信、电子、计算机应用等专业作为教材使用,也可作为成人高等学校有关专业参考教材,还可供IT类专业工程技术人员参考。限于作者的水平,不妥及错误之处在所难免,恳切希望读者给予批评指正。

作者

2007年3月于上海大学

目 录

第 8 章 数字信号的最佳接收技术	1
8.1 数字信号最佳接收的基本概念	1
8.1.1 最佳接收问题	1
8.1.2 数字通信系统的统计模型	2
8.1.3 模型参数的统计描述	2
8.2 最佳接收准则	5
8.2.1 最小差错概率准则	5
8.2.2 似然比准则	6
8.2.3 最大似然准则	7
8.2.4 多进制最大似然准则	7
8.2.5 最大输出信噪比准则	7
8.3 确知信号的最佳接收	8
8.3.1 二进制确知信号的最佳接收机	8
8.3.2 二进制确知信号最佳接收机的性能	10
8.3.3 二进制确知信号的最佳形式	13
8.3.4 多进制确知信号的最佳接收机及其性能	15
8.4 随相信号的最佳接收机*	16
8.4.1 二进制随相信号的最佳接收机	16
8.4.2 二进制随相信号最佳接收机的性能	19
8.5 起伏信号的最佳接收*	20
8.5.1 m 进制 FSK 起伏信号的接收	20
8.5.2 起伏信号最佳接收的性能	21
8.6 实际接收机与最佳接收机的性能比较	22
8.6.1 实际接收机与最佳接收机的性能公式比较	22
8.6.2 r 和 E_b/n_0 的相互关系	22
8.7 匹配滤波器	23
8.7.1 匹配滤波器的基本概念	23
8.7.2 匹配滤波接收原理	23

8.7.3 匹配滤波器在最佳接收中的应用	29
8.8 最佳基带传输系统	30
思考题	31
习题	32
第9章 同步原理	34
9.1 引言	34
9.2 载波同步	35
9.2.1 插入导频法	35
9.2.2 直接法	38
9.2.3 载波同步的性能指标	40
9.3 位同步	42
9.3.1 插入导频法	42
9.3.2 直接法	43
9.3.3 位同步的性能	48
9.4 群同步	50
9.4.1 起止式同步法	50
9.4.2 连贯式插入法	51
9.4.3 间隔式插入法	53
9.4.4 自群同步	54
9.4.5 群同步系统的性能指标	54
9.5 扩频同步	56
9.5.1 捕获	56
9.5.2 跟踪	58
9.6 网同步	59
9.6.1 主从同步法	60
9.6.2 相互同步法	60
9.6.3 独立时钟同步法	61
思考题	62
习题	62
第10章 信源编码	64
10.1 引言	64
10.2 信源的无失真编码原理	65
10.2.1 信源无失真编码的基本原理	65

10.2.2	信源编码的速率	67
10.2.3	信源编码的效率	68
10.2.4	无记忆信源的等长编码	69
10.2.5	无记忆信源的不等长编码	70
10.3	最佳无失真信源编码方法	72
10.3.1	香农第一定理	72
10.3.2	香农(Shannon)最佳编码方法	74
10.3.3	哈夫曼(Huffman)最佳编码方法	76
思考题		77
习题		77
第 11 章	信道编码	78
11.1	信道编码的基本概念	78
11.1.1	引言	78
11.1.2	信道编码的简单纠错方法	79
11.1.3	常用的简单信道编码	80
11.2	线性分组码	81
11.2.1	引言	81
11.2.2	线性分组码检错纠错能力的概念	83
11.2.3	汉明距离	84
11.2.4	线性分组码的矩阵表示	86
11.2.5	线性分组码的伴随式译码	89
11.2.6	汉明码	91
11.3	循环码	91
11.3.1	引言	91
11.3.2	循环码的多项式表示	92
11.3.3	循环码的矩阵表示	93
11.3.4	系统循环码的构成	96
11.3.5	循环码编码器	98
11.3.6	循环码译码器	102
11.4	卷积码	104
11.4.1	卷积码的基本概念	104
11.4.2	卷积码的编码方法	104
11.4.3	卷积码的图形描述	105
11.4.4	卷积码的数学描述	107

11.4.5 卷积码的译码方法	109
11.5 Turbo 码*	112
11.5.1 引言	112
11.5.2 Turbo 码的编码原理	113
11.5.3 Turbo 码的译码原理	114
思考题	114
习题	115
第 12 章 先进的数字通信技术	117
12.1 引言	117
12.2 交换技术	117
12.2.1 电路交换	118
12.2.2 分组交换	120
12.2.3 ATM 交换	123
12.3 扩频通信	127
12.3.1 基本概念	128
12.3.2 工作原理及主要工作方式	129
12.3.3 主要特点	133
12.3.4 扩频通信技术的应用现状	136
12.4 OFDM 技术	136
12.4.1 基本概念	136
12.4.2 主要原理及技术	138
12.4.3 应用举例	143
12.5 多址技术	146
12.5.1 概述	146
12.5.2 三种多址技术特点	148
思考题	150
第 13 章 通信网	151
13.1 引言	151
13.1.1 通信网的分类	151
13.1.2 通信网现状及发展趋势	152
13.2 通信网理论基础	154
13.2.1 通信网的基本结构及构成要素	154
13.2.2 通信网的网络体系结构	155

13.2.3	通信网的基本传输规程	160
13.3	电话通信网	163
13.3.1	业务网	164
13.3.2	支撑网	166
13.4	数据通信网	167
13.4.1	分组交换网	168
13.4.2	数字数据网(DDN)	170
13.4.3	计算机通信网	172
13.5	移动通信网	176
13.5.1	移动通信发展历史	176
13.5.2	多种形式的移动通信网	178
13.5.3	第四代移动通信网	182
13.6	下一代网络 NGN*	183
13.6.1	含义	183
13.6.2	组成	184
13.6.3	特点	185
	思考题	186
	参考文献	187

第 8 章 数字信号的最佳接收技术

由于信道特性的不理想、信道中存在噪声等不利因素,都将直接作用到接收端,从而对信号接收产生影响,因此,对于一个通信系统的质量而言,接收系统的性能非常关键。本章以接收问题作为研究对象,着重分析数字通信系统中如何从噪声中最好地提取有用信号,即着重讨论数字信号最佳接收的基本原理与基本方法。

本章首先将介绍数字信号最佳接收判别准则,然后针对二进制数字信号,着重分析并推导了确知信号的最佳接收机的结构及性能;作为扩展,给出了随相信号、起伏信号的最佳接收机的结构与性能,以及多进制数字信号的最佳接收机的结构。本章还对实际数字接收机与最佳数字接收机的性能进行了比较,并讨论了匹配滤波器的原理及实现,分析了使用匹配滤波器的最佳接收机的结构及性能,最后就理想信道情况下数字基带传输系统的最佳化进行了研究。

8.1 数字信号最佳接收的基本概念

8.1.1 最佳接收问题

1. 什么是最佳接收

任何一个通信系统,都可分为三大部分:信号发射部分、信号传输(信道)部分、信号接收部分。若发射、传输以及接收的都是数字信号,即为数字通信系统。

通信的目的就是要让信号从发射端发出,经信道传输,从而顺利到达接收端,并在接收端得到正确的结果。然而信道中有许多因素会对信号的传输产生不利的影响,例如信道特性的不理想,信道中存在的噪声等。这些都会影响信号的正确传输,使到达接收端的信号与原发射端信源送出的信号相比,发生了种种的变化,从而使接收端得到错误的结果。

如果我们在接收端设计的接收机能够抵抗一些信道中的干扰噪声,使在接收端收到的信号得到尽可能少的错误结果,这是通信系统所希望的。

所谓数字信号最佳接收的问题,就是通过对数字通信系统的分析,来了解采用什么样的接收机才能得到最佳的接收效果;对同样的接收机,发送端采用什么样的数字信号形式在接收端得到的接收效果更好,以及与此相关的一些技术问题。

2. 解决最佳接收的两种方法

我们可以用两种方法来解决最佳接收问题:一种是用概率的方法,即用与数字通信系统的性能参数直接相关的统计判决方法,使系统的错误概率达到最小,又叫相关接收;另一

种是使系统的输出信噪比达到最大的方法,即匹配滤波器方法。

本章首先用概率的方法来分析最佳接收问题,其次再介绍如何用匹配滤波器的方法来解最佳接收问题。

8.1.2 数字通信系统的统计模型

由于实际中发送端所发送的数字信号对接收端来说是不确定的,而且信号在传输的过程中由于系统或传输衰减等方面的原因,可能发生种种畸变,或是受到随机噪声的干扰,因此在接收端所收到的信号也是一个不确定的随机数字信号,可用统计数学的方法来进行分析和处理。

数字通信系统的模型我们已经很熟悉了,现在重画于图 8.1.1。

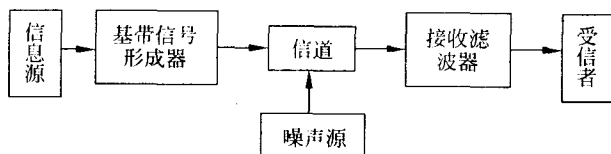


图 8.1.1 简化的数字通信系统模型

为了用统计数学的方法来分析数字通信系统中的随机数字信号接收问题,可以用图 8.1.2 所示的统计判决模型来描述图 8.1.1 所示的数字通信系统。

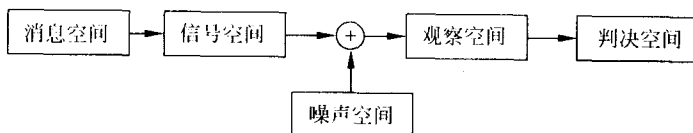


图 8.1.2 统计判决模型

由图 8.1.2 可见,这个统计判决模型是由 5 个空间构成:消息空间代表信息源中要传送的消息;信号空间代表将消息转换为适合信道传输的信号;噪声空间代表噪声源中所产生的噪声;观察空间表示接收机收到的信号;而判决空间代表按照一定的判决准则进行判决后的所有可能结果。

8.1.3 模型参数的统计描述

1. 消息空间的参数描述

在消息空间中,以参数 x 表示离散信源所有可能的取值。设离散信源所有可能的取值有 m 个,则可以表示为: $x_1, x_2, \dots, x_m$ 。若发送端对每一个可能取值的发送是互相独立的,则 x_i 的出现概率可以用一维概率分布 $P(x_i), i=1, 2, \dots, m$ 来表示,且有

$$\sum_{i=1}^m P(x_i) = 1 \quad (8.1-1)$$

当信源中各消息出现的概率相等,则为等概情况,有

$$P(x_1) = P(x_2) = \cdots = P(x_m) = \frac{1}{m} \quad (8.1-2)$$

2. 信号空间的参数描述

消息必须变换成信号才能在信道中传输。在信号空间中,以参数 s 来表示要发送的信号。因为 s 与 x 之间必须建立一一对应的关系,所以 s 的统计规律由 x 的概率分布所确定,即有

$$P(s_i) = P(x_i), \quad i = 1, 2, \cdots, m \quad (8.1-3)$$

且有

$$\sum_{i=1}^m P(s_i) = 1 \quad (8.1-4)$$

3. 噪声空间的参数描述

设通信系统中的噪声是均值为 0、方差为 σ_n^2 的高斯随机过程,用 $n(t)$ 表示。它的统计特性要用多维联合概率密度函数来描述。令 $n(t)$ 的 k 维联合概率密度函数为 $f_k(n)$ (可简写为 $f(n)$), n 在 k 个不同时刻的取值为 $n_1, n_2, \cdots, n_k$, 则

$$f_k(n) = f(n) = f(n_1, n_2, \cdots, n_k) \quad (8.1-5)$$

对于线性数字通信系统,可推导出 $n(t)$ 的 k 维联合概率密度函数为 $f(n)$, 且有

$$f(n) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma_n)^k} \exp\left(-\frac{1}{n_0} \int_0^T n^2(t) dt\right) \quad (8.1-6)$$

式中: n_0 为噪声的单边功率谱密度, T 为一个码元的时间长度。

式(8.1-6)的推导如下:

由第3章中窄带随机过程给出的结果,对于高斯白噪声,其在任意两个时刻上得到的值都是互不相关的,也是互相独立的;若该高斯白噪声是频带有限的,功率谱密度为 $n_0 G_{2f_H}(f)/2$, 即最高频率分量为 f_H , 由采样定理,以 $2f_H$ 采样频率对其采样,则在采样时刻得到的值也是互不相关的,因此也是互相独立的。

对于统计模型中的噪声空间,以 $n(t)$ 来描述该噪声。而在数字通信系统中,一般假设该噪声是均值为零、方差为 σ_n^2 的带限高斯白噪声,它的统计特性要用多维联合概率密度来描述。

令 $n(t)$ 的 k 维联合概率密度函数为 $f(n)$, 在一个码元时间 $0 \sim T$ 内,按 $2f_H$ 频率采样,得到 $n(t)$ 在 k 个不同时刻的采样值 $n_1, n_2, \cdots, n_k$ 都是互相独立的,因此有

$$f(n) = f(n_1, n_2, \cdots, n_k) = f(n_1) f(n_2) \cdots f(n_k) \quad (8.1-7)$$

又因为每个采样值都是正态分布的,其一维概率密度函数可以写为

$$f(n_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp\left(-\frac{n_i^2}{2\sigma_n^2}\right) \quad (8.1-8)$$

所以

$$f(n) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma_n)^k} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_n^2} \sum_{i=1}^k n_i^2\right) \quad (8.1-9)$$

当 k 很大时,在一个码元时间 T 内收到的噪声平均功率可表示为

$$\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k n_i^2 \quad (8.1-10)$$

因为采样频率为 $2f_H$, 所以 $k=2f_H T$, 则式(8.1-10)可写为

$$\frac{1}{2f_H T} \sum_{i=1}^k n_i^2 \quad (8.1-11)$$

由帕斯瓦尔定理,一个码元时间 T 内的平均功率又可表示为

$$\frac{1}{2f_H T} \sum_{i=1}^k n_i^2 = \frac{1}{T} \int_0^T n^2(t) dt \quad (8.1-12)$$

而 $\frac{1}{2\sigma_n^2} = \frac{f_H T}{\sigma_n^2} \cdot \frac{1}{2f_H T}$, 代入式(8.1-9)得

$$f(n) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma_n)^k} \exp\left(-\frac{f_H T}{\sigma_n^2} \cdot \frac{1}{2f_H T} \sum_{i=1}^k n_i^2\right) \quad (8.1-13)$$

利用式(8.1-12)可得

$$f(n) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma_n)^k} \exp\left(-\frac{f_H}{\sigma_n^2} \int_0^T n^2(t) dt\right) \quad (8.1-14)$$

由 3.5 节式(3.5-31)可知,带限白噪声平均功率为 $\sigma_n^2 = n_0 f_H$, 即 $n_0 = \sigma_n^2 / f_H$, 代入式(8.1-14)得

$$f(n) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma_n)^k} \exp\left(-\frac{1}{n_0} \int_0^T n^2(t) dt\right) \quad (8.1-15)$$

4. 观察空间的参数描述

观察空间的参数用 $y(t)$ 来表示,它对应于数字通信系统接收端收到的信号。由图 8.1.2 统计判决模型可得

$$y(t) = s(t) + n(t) \quad (8.1-16)$$

对于假设信道噪声是均值为零、方差为 σ_n^2 的带限高斯白噪声时,由随机过程通过线性系统的分析表明,线性的数字通信系统的输出也将服从高斯分布,其方差仍是 σ_n^2 , 均值则随接收端收到的信号 $s_i(t)$ 变化,即对应于信号空间,均值为 $s_i(t)$, $i=1, 2, \dots, m$ 。

(1) 二进制情况

在二进制系统中,信号空间为 $s_1(t)=0, s_2(t)=1$ 。当收到的信号为 $s_1(t)$ 时,观察空间为

$$y(t) = s_1(t) + n(t) = n(t) \quad (8.1-17)$$

其概率密度函数可表示为 $f_{s_1}(y)$ 。利用上面分析的结果,有

$$f_{s_1}(y) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma_n)^k} \exp\left(-\frac{1}{n_0} \int_0^T y^2(t) dt\right) \quad (8.1-18)$$

这时 $y(t)$ 为均值为零、方差为 σ_n^2 的高斯分布。

当收到的信号为 $s_2(t)$ 时,观察空间为

$$y(t) = s_2(t) + n(t) = 1 + n(t) \quad (8.1-19)$$

其概率密度函数可表示为 $f_{s_2}(y)$ 。同理,有

$$f_{s_2}(y) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma_n)^k} \exp\left(-\frac{1}{n_0} \int_0^T [y(t) - 1]^2 dt\right) \quad (8.1-20)$$

这时 $y(t)$ 是均值为 1、方差为 σ_n^2 的高斯分布。通常也将 $f_{s_1}(y)$ 以及 $f_{s_2}(y)$ 称为似然函数。

(2) 多进制情况

对于 M 进制系统,信号空间为 $s_i(t)$, $i=1, 2, \dots, M$ 。按上面同样的方法可以推导出,在

观察空间收到的信号为 $s_i(t)$ 时, $y(t)$ 的概率密度函数为

$$f_{s_i}(y) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma_n)^k} \exp\left(-\frac{1}{n_0} \int_0^T [y(t) - s_i(t)]^2 dt\right) \quad (8.1-21)$$

式中: $y(t)$ 是均值为 $s_i(t)$ 、方差为 σ_n^2 的高斯分布, 也常将 $f_{s_i}(y)$ 称为似然函数。

5. 判决空间的参数描述

判决空间用参数 γ 描述, 它表示数字通信系统在接收端按一定的判决准则可能得到的所有结果, 它与消息空间相对应, 即 γ_i 的可能取值与 x_i 的可能取值相同, 当 x 有 M 个可能取值时, γ 也有 M 个可能取值, 即为 $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_M$ 。

8.2 最佳接收准则

8.2.1 最小差错概率准则

这里以二进制数字通信系统为例来说明该准则。

在二进制数字通信系统中, 发射端的消息空间只有两种状态 x_1 和 x_2 , 信号空间 s 也只有两种状态 s_1 和 s_2 。设 $s_1(t) = 0$, s_1 出现的概率为 $P(s_1)$; $s_2(t) = 1$, s_2 出现的概率为 $P(s_2)$, $P(s_1)$ 和 $P(s_2)$ 也可称为先验概率, 则有

$$P(s_1) + P(s_2) = 1 \quad (8.2-1)$$

在系统的接收端, 把观察空间所取的值域 Y 划分成两个区域 A_1 和 A_2 , Y 中的每一个点对应 $y(t)$ 的一个实现, Y 域的几何表示如图 8.2.1 所示。

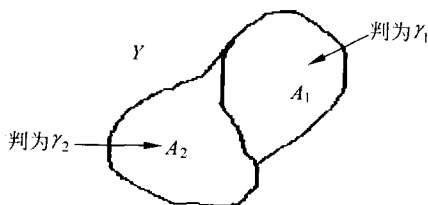


图 8.2.1 Y 域的几何表示

判决空间与消息空间相对应只有两种状态 γ_1 和 γ_2 。设数字通信系统在无任何干扰影响下正确传输时, 发射端发射信号为 s_1 时, 接收端 $y(t)$ 落入 A_1 域中判为 γ_1 ; 发射端发射信号为 s_2 时, 接收端 $y(t)$ 落入 A_2 域中判为 γ_2 。实际中, 由于噪声等影响, 当发射端发射信号为 s_1 时, 接收端 $y(t)$ 可能会落入 A_2 域中判为 γ_2 , 其错误转移概率为 $P(\gamma_2/s_1)$; 发射端发射信号为 s_2 时, 接收端 $y(t)$ 也可能落入 A_1 域中判为 γ_1 , 其错误转移概率为 $P(\gamma_1/s_2)$ 。这样, 系统总的传输差错概率为

$$P_e = P(s_1)P(\gamma_2/s_1) + P(s_2)P(\gamma_1/s_2) \quad (8.2-2)$$

使式(8.2-2)的传输误差概率最小, 即为最小差错概率准则。