



普通高等教育“十三五”规划教材  
电子信息科学与工程类专业规划教材

# 数字通信原理

## (第2版)

Principles of Digital Communications  
Second Edition

◎ 冯穗力 等编著



中国工信出版集团



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十三五”规划  
电子信息科学与工程类专业规划教材

# 数字通信原理

## (第2版)

冯穗力 余翔宇 柯 峰  
余 荣 刘圣海 胡 洁 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书介绍数字通信的基本理论与技术，主要内容包括数字通信的信号分析基础、信源和信道编码、信息论基础、信号的基带传输、调制解调技术、信道特性、差错控制编码、同步技术、扩频通信和信道复用与多址技术等。本书的特点是，注重理论分析和推导的严谨性，强调物理概念。本书提供配套的电子课件和习题解答，需要电子课件的教师请登录华信教育资源网 [www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn) 免费注册后下载。

本书适合作为信息与通信工程等专业本科生的教材和研究生的参考书，也可供通信领域的科研和工程技术人员参考。

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

数字通信原理/冯穗力等编著. —2 版. —北京: 电子工业出版社, 2016.8

ISBN 978-7-121-28870-8

I. ①数… II. ①冯… III. ①数字通信—高等学校—教材 IV. ①TN914.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 109726 号

策划编辑: 谭海平

责任编辑: 谭海平 特约编辑: 王 崧

印 刷: 北京京科印刷有限公司

装 订: 三河市良远印务有限公司

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: 34.5 字数: 1092 千字

版 次: 2016 年 8 月第 1 版

印 次: 2016 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 79.00 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, 88258888。

质量投诉请发邮件至 [zlts@phei.com.cn](mailto:zlts@phei.com.cn)，盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

本书咨询联系方式: (010) 88254552, [tan02@phei.com.cn](mailto:tan02@phei.com.cn)。

# 前 言

数字通信已成为现代通信系统的一项基本技术。近几十年来,国内外出版了大量有关通信原理和通信系统方面的教材,特别是有关数字通信原理方面的教材,其中不乏优秀的著作。这些教材各具特色,培养了一代又一代通信等领域的工程技术人员。随着20世纪末和21世纪初电子技术、信息技术和通信网络等工程应用技术的迅速发展,在大学中电子、信息与通信领域专业课程和教学内容的设置,也发生了许多变化。其中,最明显的改变是增设了许多基于计算机技术和方法的各种专业课程,原有包括通信原理在内的许多经典课程的教学课时数不得不压缩。同时,互联网的普及应用也使得学生获取各类知识的来源和内容变得更加丰富与多元化。因此,需要考虑如何在有限的课时内以更有效的方式介绍数字通信原理的内容。另外,随着计算机与数字信号处理软/硬件技术、可编程阵列器件和集成电路等技术的发展,通信系统,特别是数字通信系统的物理实现方式,也发生了很大的变化。通信系统中要实现的各种功能,已经极少以单元电路的形式出现,这些变化日益凸显了通信系统的理论与各种算法的重要性。本书的编著者在撰写本书时,考虑了上述这些变化因素。本书有如下的特点:

1. 本书对于学生在大学阶段需要掌握的数字通信的基本原理,进行了详尽的叙述。对于有关定理和重要的结论,只要其证明过程在本科阶段该专业学生的数学知识范围内,都会给出完整的分析。其中对有些我们认为学生较难理解的知识点和重要方法的讨论,甚至到了不厌其烦的程度。通过这种方式我们试图达到如下的目的,即让教师在本课程的有限课堂教学的学时中,重点讲授基本原理、物理概念和其他一些实例,详细证明过程可以省略。有关定理证明过程的所有数学分析和推导,基本上都可以让学生自己在课后通过阅读本教材获得。

2. 考虑到数字通信原理是一门有关通信系统和技术的基础性课程,同时注意到现代通信系统主要基于专用集成电路、计算机、高速数字信号处理器以及可编程阵列器件等方法构建和物理实现等特点,在教材的内容安排上,除非涉及解释原理和概念的需要,基本上未涉及有关通信系统中某个功能单元电路的具体实现问题。有关这些知识的了解,我们设想学生可以在了解基本原理的基础上,通过与数字通信原理课程配套的实验或课程设计等方式来达到。

3. 书中采用了大量图示方法,如原理框图、频谱特性和信号波形等,来解释和描述通信过程中的各种物理现象,以便形象地反映通信系统中各种信号的特征,使读者可更好地加深对其物理概念的理解。

4. 注意到正交频分复用(OFDM)已成为宽带无线通信系统的一项基本技术,本书与许多近期出版的通信原理教材一样,增加了这方面的内容。另外,考虑到无线通信的应用日益广泛,在介绍传输信道时突出了对无线信道特性的分析。同时为强调信道特性对信号正确接收和解调的密切关联性,将信道均衡部分的内容整合到了传输信道一章中。

5. 对于数字通信原理课程中原有的经典内容,在信息论基础方面,增加了有关信源编码方面的讨论。考虑到目前应用广泛的MSK和GMSK等信号的重要性,本书对其进行了详细讨论,对于其中难以用数学公式解释的信号解调过程,通过示例进行了分析和说明。同时考虑到差错控制编码在数字通信系统中的重要性,本书对于线性分组码和卷积码的内容,特别是BCH码的译码、卷积码的软译码和凿孔码等方面的内容,进行了较大的加强。另外,在同步方面,讨论了更多的方法和技术。

6. 本书努力吸收了现有的一些国外教材中有利于学生对加深对数字通信原理的理解和知识应用等方面的内容,如第2章中有关信号带宽的描述、第7章中有关信道特性的内容、第8章中有关调制与编码的权衡等。

7. 为提示读者对每一知识点的关注和在阅读过程中对问题的理解,文中对每个较为重要问题的讨论,前面都尽可能给出文字经加重的标题,对每段文字中首次出现的关键字,通常都用加粗的**宋体字**对其加以凸显。

本书对内容的表述和定理的证明力图详尽,对此我们也担心自学的读者在阅读过程中,可能会陷入对分析证明过程的细节的过于关注,反而忽略了对基本概念和原理的理解与掌握。因此,我们希望读者在学习过程中,要谨记最重要的不是了解一些定理的证明方法或解题技巧,而是掌握数字通信的基本概念、原理和方法。而这些关键知识主要包含在定义、定理等基本内容中,所有有关细节的叙述、分析和讨论,都是为理解定义、定理等基本内容服务的。

本书介绍的主要是大学本科阶段通信原理课程的基本内容。全书共分11章,第1章**绪论**介绍通信的发展概况、通信系统的基本组成、数字通信的特点以及通信系统的主要参数;第2章**信号分析基础**讨论本书中主要用到的信号分析和处理方法;第3章**模拟信号的数字编码**分析通信系统中模拟信号变为数字信号过程中的有关问题,引入各类脉冲编码调制的方法;第4章**信息论基础**介绍信息的定义、信息的度量以及信源编码的基本概念和方法,介绍香农有关信道容量的概念;第5章**数字基带传输系统**介绍信号波形设计和编码的基本原理、基带信号功率谱的分析方法、基带信号传输的基本准则和最佳接收方法;第6章**数字载波调制传输**讨论各种数字载波调制与解调的原理以及各种方法的性能;第7章**传输信道**简要分析通信系统中各类信道的特性、不同条件下信道容量估算,以及信道估计与均衡的基本方法;第8章**差错控制编码**介绍实现差错控制的基本概念,讨论差错控制编码中最基本的线性分组码和卷积码编码方法;第9章**同步原理与技术**分析锁相环的基本原理,研究载波同步、符号同步与帧同步等方法和技术;第10章**扩展频谱通信技术**介绍扩频的基本概念和作用,以及直接序列扩频和跳频扩频的基本原理和方法;第11章**信道复用与多址接入**介绍信道复用与多用户如何接入系统的基本概念和方法。

本书中包含的基本内容,如各种编码与调制解调方式、香农定理、奈奎斯特准则、差错控制编码等,都是数字通信原理中最为经典的内容,几乎都会出现在任何一本通信原理的教科书中,因此本书中都未列出这些经典内容的原始参考文献的出处。本书中的每一章之后给出的参考文献,主要是在内容的表述方面对本书影响较大,或读者要对相关部分做进一步深入了解而需要阅读的文献,另外还有一部分是书中某些重要曲线或参数表的出处。毫无疑问,在本书的撰写过程中参阅了国内外许多同行的著作,其中许多章节内容的表述方法受到了这些著作的影响。特别是书中采用的习题来自许多不同教材和习题集中比较有代表性的题目,其中许多习题在各种教材和习题集中反复出现。因此,我们很难将这些文献详细列出,在此对这些文献的作者深表感谢。

本书主要由冯穗力编撰,其中余翔宇参加了第3章和第11章的编写,柯峰参加了第5章的编写,余荣参加了第6章和第9章的编写,胡洁参加了习题部分的整理,刘圣海编写了第10章。全书由冯穗力整理、完善和定稿。余翔宇在本书的编撰过程中做了许多与出版社间的协调工作,并参与了书稿最后的整理。

本书的编写过程得到了本书主编研究生的大力支持,书中所有需要用公式计算得到的原始曲线均由周雄同学绘制,周珮诗、刘梦华、郭销淳和周雄等同学对本书的文字校订做了大量繁复的工作。没有他们的努力,要完成本书的编撰显然是困难的。本书在出版之前,曾作为讲义在华南理工大学08、09级信息工程专业4个班的“数字通信原理”课程中使用,在此过程中同学们提出了许多宝贵的意见,其中解可可同学对同学们反映的问题做了特别多的整理和记录工作。在本书作为讲义使用期间,得到了华南理工大学电子与信息学院才建东和徐向民两位老师的大力支持与帮助,在此我们深表感谢。感谢叶梧老师对本书编撰过程中的指导工作。我们要特别感谢电子工业出版社高教分社对本教材出版的支持。

本书提供有辅助教学的材料和习题的全部解答,使用本教材的老师可通过华信教育资源网([www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn))免费注册获取,或通过邮件 [tan02@phei.com.cn](mailto:tan02@phei.com.cn) 获取。限于本书编著者的水平,书中一定存在许多有待完善之处甚至错误,欢迎读者通过出版社或各种方式提出指正问题的宝贵意见。本书的编撰得到了华南理工大学教学改革项目资金的资助。

冯穗力

于广州五山华工校园

2012年6月



## 第 2 版说明

本书第 2 版保持了第 1 版的基本内容和风格, 根据第 1 版在教学使用过程中发现的问题, 进行了修改完善。所做的修订主要有: 对部分内容的编排进行了调整, 修改了第 1 版中部分表述欠妥的内容, 同时纠正了第 1 版中符号或图表中出现的错误。另外, 对习题部分也进行了调整和修订, 使其能够更好地与教材的基本内容配合使用。数字通信原理是一门系统性的课程, 内容涉及很广, 尽管在第 2 版中对原书进行了全面的修订, 仍可能存在不足甚至错误, 恳请读者批评指正。

在第 1 版教材的使用过程中, 许多老师和同学提出了宝贵的意见, 这对本教材的修订和完善发挥了巨大的作用, 在此作者深表谢意。作者感谢周智恒、李波、丁跃华、刘蕴、罗劲洪、张鑫、刘元和季飞等老师所提出的修改意见, 感谢研究生黄桂冰和韩民钊同学在本书第 2 版校对中所做的认真细致的工作。

感谢广东省科技计划项目(编号 2016A010101009)对本教材第 2 版出版的支持。

冯穗力

于广州五山华工校园

2016 年 7 月

# 常用符号说明

符 号	说 明	出现节号
$\arg$	函数的自变量值 ( $\arg f(x) = x$ )	4.6
$B_c$	相干带宽	7.4.3
$B_D$	多普勒扩展	7.4.3
$B_L$	环路噪声带宽	9.2.2
$c$	光在真空中的传播速度	7.3.1
$C$	信道容量, 纠错编码字集/码字	4.3.4, 8.4
$C_N$	归一化信道容量	4.4.5
$C_r$	接收端已知信道边信息时的信道容量	7.5.1
$C(X)$	码多项式	8.7.1
$C_S(X)$	系统码码多项式	8.7.2
$\{C\}$	码字集	8.4
$d_{mk}$	信号 $s_m(t)$ 与 $s_k(t)$ 间的欧氏距离	6.4.1
$d_{\min}$	信号集中信号间的最小欧氏距离	6.4.1
$d_{\min}$	最小汉明距离	8.6.1
$D[\ ]$	求方差运算	2.6
$\bar{D}$	平均失真度	4.6.1
$D$	峰值畸变	5.7.2
$D_A$	眼图中的峰值畸变参数	5.5.3
$D(w_i, w_j)$	码字 $w_i$ 与 $w_j$ 间的汉明距离	8.6.1
$E$	码字错误图样	8.6.3
$E(X)$	码字错误图样对应的多项式	8.7.2
$E[\ ]$	求均值运算	2.6
$E_b$	比特能量 (平均传输 1 比特数据所需要的能量, 单位为焦耳)	1.5
$E_b/N_0$	比特能量与噪声功率密度谱的比 (单位为秒/赫兹)	1.5
$E_g$	波形函数 $g_T(t)$ 的能量	2.2
$f_i(t) * f_j(t)$	函数 $f_i(t)$ 与 $f_j(t)$ 的卷积	2.2
$f_T(t)$	信号 $f(t)$ 的截短函数	2.2
$\hat{f}(t)$	实函数 $f(t)$ 的希尔伯特变换	2.4
$f^{-1}(x)$	信号 $f(x)$ 的反函数	2.7
$f_B$	锁相环基准频率	9.2.2
$f_D$	多普勒频移	7.4.1
$f_{D\max}$	最大的多普勒频移	7.4.2
$f_T(t)$	信号 $f(t)$ 的截短函数	2.2
$f_{VCO}$	压控振荡器输出信号的工作频率	9.2.2
$F(\omega)$ ( $F(f)$ )	信号 $f(t)$ 的傅里叶变换	2.9

(续表)

符号	说明	出现节号
$F_T(\omega)$	信号 $f_T(t)$ 的傅里叶变换	2.2
$g_T(t)$	持续时间为一个码元周期 $T$ 的基带信号波形	5.4
$G$	代数中的群/交换群	8.5
$\mathbf{G}$	生成矩阵	8.6.3
GF(2)	二元有限域	8.5
GF( $2^n$ ) (GF( $p^n$ ))	$2^n$ ( $p^n$ ) 元有限域	8.5
$g(X)$	生成多项式	8.7.1
$\mathbf{G}(X)$	生成多项式矩阵	8.7.3
$G_p$	预测增益	3.5.1
$\hat{G}_p$	处理增益	10.2.3
$h_E(t)$	时域均衡横向滤波器的冲激响应	7.6.3
$h_L(\tau, t)$	时变信道的冲激响应	7.4.1
$\mathbf{H}$	监督矩阵	8.6.3
$H(Z)$	传递函数	3.4.1
$H(X)$	$X$ 的熵函数 (单位为比特/符号)	4.2.2
$\mathbf{H}(X)$	监督多项式矩阵	8.7.3
$H(X Y)$	$X$ 在已知 $Y$ 条件下的条件熵函数 (单位为比特/符号)	4.2.4
$H(XY)$	$X$ 与 $Y$ 的联合熵函数 (单位为比特/符号)	4.2.4
$\mathbf{H}_E$	扩展汉明码的监督矩阵	8.6.6
$H_{IL}(\omega)$	具有最窄频带的无码间串扰基带传输系统	5.5.2
$H(\omega, t)$	时变随参信道特性	7.2.3
$H_D(\omega)$	信道失真函数	5.7
$H_E(\omega)$	信道均衡函数	7.6.3
$I(x_i)$	符号 $x_i$ 包含的信息量 (单位为比特)	4.2.1
$I(x_i; y_j)$	$x_i$ 与 $y_j$ 间的互信息量 (单位为比特)	4.3.2
$I(X; Y)$	$X$ 与 $Y$ 间的平均互信息量 (单位为比特)	4.3.2
$I_n$	信号星座图中星座点的横坐标值	1.4
$I_0(x)$	零阶修正的贝塞尔函数	2.10
$J$	雅可比行列式	2.10
$J_T$	眼图中的过零点畸变参数	5.5.3
$\text{lb}(\cdot)$	$\text{lb}(\cdot) = \log_2(\cdot)$	1.5
$\text{lg}(\cdot)$	$\text{lg}(\cdot) = \log_{10}(\cdot)$	1.5
$\text{ln}(\cdot)$	$\text{ln}(\cdot) = \log_e(\cdot)$	4.2.1
$L_p$	路径损耗	7.3
$L_{PT}$	总的传输损耗	7.7.2
$M_N$	眼图中的噪声容限参数	5.5.3
$\bar{n}$	平均码字长度	4.5.3
$(n, k)$	码字长度为 $n$ 、信息位长度为 $k$ 的线性分组码	8.6
$(n, k)$	码组长度为 $n$ 、信息位长度为 $k$ 、约束长度为 $L$ 的卷积码	8.8.1
$N_0$	噪声功率谱密度 (单位为瓦/赫兹)	1.5
$p(x)$	连续随机变量变量 $X$ 的概率密度函数	4.4.1



(续表)

符号	说明	出现节号
$p(x_i)$	连续随机变量概率密度函数在 $x_i$ 处的取值	4.4.1
$P(x_i)$	离散随机变量 $X$ 取值为 $x_i$ 的概率	4.2.1
$p_X(x)$	$X(t)$ 幅度取值的联合概率密度函数	2.10
$p_{XY}(x, y)$	$X(t)$ 与 $Y(t)$ 幅度取值的联合概率密度函数	2.10
$P(\omega)$ ( $P(f)$ )	信号的功率密度谱 ( $P(f)$ 的单位为瓦/赫兹)	2.9
$P_b$	误比特率 (误信率)	1.5
$P_E$	错误概率 (误比特率、误码率)	4.5.2
$P_S$	误码率 (误符号率)	1.5
$P_r$	接收信号功率	7.3
$P_t$	发送信号功率	7.3
$P_{out}$	中断概率	7.4.1
$P_{suc}$	报文成功发送概率	11.6
$p(\mathbf{r}   \phi_c)$	载波相位 $\phi_c$ 的似然函数	9.3.3
$p(\mathbf{r}   \tau)$	参数 $\tau$ 的似然函数	9.4.3
$p(z   s_i)$	信号 $s_i(t)$ 的似然函数	5.8.1
$P_{S,N}(f)$	信号 $s(t)$ 的截短函数 $s_N(t)$ 的功率密度谱	5.4.1
$Q_n$	信号星座图中星座点的纵坐标值	1.4
$Q(x)$	数学中的 $Q$ 函数	5.8.2
$R$	编码速率	4.5.1
$R(D)$	失真函数	4.6.1
$R(\tau)$ ( $R_X(\tau)$ )	信号 $f(t)$ ( $X(t)$ ) 的自相关函数	2.6
$R_{ij}(\tau)$ ( $R_{XY}(\tau)$ )	信号 $f_i(t)$ 和 $f_j(t)$ 的互相关函数 (信号 $X(t)$ 和 $Y(t)$ 的互相关函数)	2.6
$R_b$	比特速率 (单位为比特/秒、bits/s、b/s 或 bps)	1.5
$R_S$	符号速率 (码元速率) (单位为波特、Baud、符号/秒)	1.5
$R_h(\tau_1, \tau_2; t, t + \Delta t)$	时变信道冲激响应的自相关函数	7.4.3
$R_h(\tau_1, \tau_2; \Delta t)$	广义平稳时变信道冲激响应的自相关函数	7.4.3
$R_h(\tau)$	功率时延谱	7.4.3
$R_t$	编码速率	8.4
$R(X)$	接收码字多项式	8.7.3
$s_{GMSK}(t)$	GMSK (高斯滤波最小频移键控) 信号	6.5.2
$s_{MSK}(t)$	MSK (最小频移键控) 信号	6.5.1
$s_N(t)$	信号 $s(t)$ 的截短函数	5.4.1
$s_{OFDM}(t)$	正交频分复用信号	6.6.2
$s_p(t)$	抽样脉冲序列	3.1.1
$s_\delta(t)$	由周期出现的冲激函数构成的抽样脉冲序列	3.2.1
$\text{sgn}(t)$	数学中的符号函数	2.4
$\text{sinc}(t)$	奈奎斯特脉冲信号	5.6.1
$S$	伴随式 (校正子)	8.6.3
$S(X)$	伴随式对应的多项式	8.7.3
$s_B(t)$	锁相环基准信号	9.2.1
$S_c(\tau, \rho)$	散射函数	7.4.3

(续表)

符号	说明	出现节号
$S_C(\rho)$	多普勒功率谱	7.4.3
SNR	信噪比 (信号平均功率与噪声平均功率的比值)	1.5
$S_T$	眼图中的定时误差容限参数	5.5.3
$S_S$	反映眼图张开度的斜率	5.5.3
$t \in [0, T_S]$	$t$ 在闭区间 $[0, T_S]$ 上的取值	2.3
$T$	周期	2.2
$T$	参数集	2.5
$T_F$	帧周期	11.3
$T_S$	码元周期 (符号周期)	6.5.1
$T_S(J, \varepsilon)$	典型序列集	4.5.2
$\bar{T}_S(J, \varepsilon)$	$T_S(J, \varepsilon)$ 的补集, 非典型序列集	4.5.2
$u_{PD}(t)$	锁相环鉴相器的鉴相输出信号	9.2.2
$u_{VCO}(t)$	压控振荡器输出振荡信号	9.3.1
$W$	信道/信号带宽 (单位为 Hz)	1.5
$W_{IL}$	奈奎斯特带宽 (单位为 Hz)	5.5.2
$W(w_i)$	码字 $w_i$ 的码重	8.6.4
$x_{k,opt}$	最佳分层电平	3.2.4
$x_s(t)$	对 $x(t)$ 抽样得到的抽样信号	3.2.2
$x_E(kT)$	接收信号 $x(kT)$ 经均衡后的输出抽样值	7.6.4
$y_{k,opt}$	最佳量化电平	3.3.4
$z(t)$	信号 $f(t)$ 的解析信号	2.4
$\lambda$	信号波长	7.2.1
$\eta$	带宽利用率 (单位为比特/秒/赫兹, bit/s/Hz)	1.5
$\eta_C$	编码效率	4.5.1
$\eta_S$	符号带宽利用率 (单位为 Baud/Hz)	1.5
$\xi$	锁相环的环路阻尼系数	9.2.2
$\phi_{ML}$	载波相位的最大似然值	9.3.3
$\Lambda(\phi_c)$	载波相位的等效似然函数	9.3.3
$\Lambda_L(\phi, \tau)$	参数 $\phi_c$ 和 $\tau$ 的联合等效似然函数	9.4.4
$\mu_x$	$x(t)$ 幅度取值的均值	5.4.1
$\mu_{T_m}$	平均时延扩展	7.4.3
$\sigma_x^2$	信号 $x(t)$ 幅度取值的方差	3.4.3
$\sigma_o^2$	过载量化误差均方差	3.3.1
$\sigma_q^2$	量化误差均方差	3.3.1
$\sigma_Q^2$	总的量化噪声	3.3.1
$\sigma_{T_m}$	均方根时延扩展	7.4.3
$\gamma_0$	判决门限	5.8.1
$\rho_{mk}$	信号 $s_m(t)$ 与 $s_k(t)$ 的互相关系数	5.5.2
$\Delta_k$	量化阶距	3.3.1
$\Psi_k(t), k=1, 2, \dots, K$	正交基函数	2.3

(续表)

符号	说明	出现节号
$\Delta M$	$\Delta$ 调制(增量调制)	3.6
$\Gamma_X(t_1, t_2)$	$X(t)$ 的自协方差函数	2.6
$\Gamma_{XY}(t_1, t_2)$	$X(t)$ 与 $Y(t)$ 的互协方差函数	2.6
$[\Gamma_X]$	$X(t)$ 的协方差矩阵	2.10
$\langle X(t) \rangle$	$X(t)$ 的时间平均值	2.8
$\langle s_i(t), s_j(t) \rangle$	信号 $s_i(t)$ 与 $s_j(t)$ 的内积	2.3
$[p(X/Y)]$ ( $[p(x_i/y_j)]$ )	信道后验概率矩阵	4.3.1
$[p(Y/X)]$ ( $[p(y_j/x_i)]$ )	信道转移概率矩阵	4.3.1
$\mathfrak{F}[x(t)]$	对信号 $x(t)$ 取傅里叶变换	2.4
$\mathfrak{F}^{-1}[\ ]$	傅里叶逆变换	2.4
$\{S\}$ ( $\{S_i, i=1, 2, \dots, L\}$ )	有限元素的符号集(包含 $L$ 个元素的有限元素符号集)	8.4
$\{\Psi_k(t)\}$ ( $\{\Psi_k(t), k=1, 2, \dots, N\}$ )	有限函数集(包含 $N$ 个函数的有限函数集)	2.3
$\tau_G(f)$	群时延	2.11
*	卷积运算符	2.2
$\square$	定理证明的结束或例题的结束	1.6
$\Leftrightarrow$	该符号两侧的函数构成一个傅里叶变换对	2.2
$\Leftrightarrow$	该符号两侧的函数构成一个 Z 变换对	3.4.2
$\Leftrightarrow$	该符号两侧的函数构成一个拉普拉斯变换对	9.2.2
$\leftrightarrow$	表示等价关系	4.6
$\cup$	两个集合的并	4.5.2
$\cap$	两个集合的交	4.5.2

# 目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 近代与现代通信技术的发展历史和现状	1
1.2 数字通信系统的基本组成	3
1.3 数字通信的特点	3
1.4 数字通信系统的基本性能指标及其度量参数	6
1.5 本书的内容安排	7
习题	8
主要参考文献	8
第 2 章 信号分析基础	9
2.1 引言	9
2.2 确定信号分析方法回顾	9
2.3 信号的矢量表示	13
2.4 希尔伯特变换及应用	15
2.5 随机信号的基本概念和特点	21
2.6 随机过程的主要统计特性	23
2.7 随机变量函数的分布及数字特征	25
2.8 平稳随机信号	26
2.9 信号功率谱密度	28
2.10 通信系统中几种常用的随机过程	30
2.11 平稳随机过程与时不变线性系统	36
2.12 循环平稳随机过程	39
2.13 匹配滤波器	43
2.14 信号的带宽	47
2.15 常用的几种特殊函数	50
2.16 本章小结	51
习题	51
主要参考文献	53
第 3 章 模拟信号的数字编码	54
3.1 引言	54
3.2 低通和带通信号抽样定理	54
3.2.1 低通信号理想抽样	54
3.2.2 低通信号自然抽样	55
3.2.3 混叠现象与低通抽样定理	56
3.2.4 带通抽样定理	58
3.3 模拟信号的量化	61
3.3.1 标量量化	61
3.3.2 矢量量化	63
3.3.3 均匀量化	64
3.3.4 非均匀量化	67
3.3.5 对数量化	72
3.4 脉冲编码调制	77

3.4.1	常用的 PCM 编码方式	77
3.4.2	$A$ 律与 $\mu$ 律 PCM 编码	78
3.4.3	对数 PCM 与线性 PCM 间的变换	81
3.5	差分脉冲编码调制 (DPCM)	83
3.5.1	预测编码的基本概念	84
3.5.2	信号预测的基本方法	85
3.5.3	自适应差分脉冲编码调制	89
3.6	增量调制 ( $\Delta M$ 调制)	91
3.6.1	简单增量调制	92
3.6.2	增量总和调制—— $\Delta$ - $\Sigma$ 调制	95
3.6.3	数字压扩自适应增量调制	97
3.7	不同编码方式的误码性能分析	99
3.7.1	增量调制编码的误码性能分析	99
3.7.2	线性 PCM 编码的误码性能分析	101
3.7.3	两种编码的抗误码性能比较	102
3.8	本章小结	103
	习题	103
	主要参考文献	104
<b>第 4 章</b>	<b>信息论基础</b>	<b>105</b>
4.1	引言	105
4.2	信息的度量	105
4.2.1	离散信源信息的度量	106
4.2.2	离散信源的平均信息量——信源的熵	107
4.2.3	熵的最大化	107
4.2.4	离散信源的联合熵与条件熵	111
4.3	离散信道及容量	112
4.3.1	信道的模型	112
4.3.2	互信息量	113
4.3.3	熵函数与平均互信息量之间的关系	114
4.3.4	离散信道的容量	116
4.3.5	离散无记忆对称信道及特性	119
4.4	连续信源、信道及容量	121
4.4.1	连续信源的相对熵	121
4.4.2	连续信源的相对条件熵和互信息量	123
4.4.3	连续信源的相对熵的最大化	125
4.4.4	加性高斯噪声干扰信道的容量	127
4.4.5	信道容量和信道带宽的归一化分析	131
4.5	信源编码的基本概念与方法	133
4.5.1	离散无记忆信源	133
4.5.2	离散无记忆信源的等长编码	135
4.5.3	离散无记忆信源的不等长编码	143
4.5.4	霍夫曼编码	149
4.6	信道编码的基本概念与方法	154
4.6.1	离散无记忆信道的转移矩阵与后验概率矩阵	154
4.6.2	最大后验概率译码准则	156
4.6.3	最大似然译码准则	157
4.6.4	费诺不等式	158

4.6.5	信道编码定理	160
4.7	率失真理论	166
4.7.1	平均失真度	166
4.7.2	率失真函数	167
4.8	本章小结	176
	习题	176
	主要参考文献	179
<b>第 5 章</b>	<b>数字基带传输系统</b>	<b>180</b>
5.1	引言	180
5.2	基带传输系统基本模型	180
5.3	基带信号的波形设计与编码	181
5.3.1	基带信号的波形设计原则	181
5.3.2	基带信号的基本波形	182
5.3.3	常用的基带信号传输码型	183
5.4	基带信号的功率谱	186
5.4.1	二进制纯随机序列基带信号的功率谱	186
5.4.2	二进制平稳序列基带信号的功率谱	190
5.5	码间串扰与波形传输无失真的条件	192
5.5.1	基带信道的传输特性与码间串扰	192
5.5.2	奈奎斯特第一准则	193
5.5.3	奈奎斯特第二准则	200
5.5.4	奈奎斯特第三准则	202
5.6	部分响应基带传输系统	203
5.6.1	部分响应系统的信号波形特性	203
5.6.2	预编码和相关编码	207
5.7	基带信号的检测与最佳接收	210
5.7.1	加性高斯白噪声干扰下的信号检测	210
5.7.2	基带信号的最佳接收	215
5.7.3	基带传输系统特性的眼图观测方法	219
5.8	本章小结	220
	习题	220
	主要参考文献	223
<b>第 6 章</b>	<b>数字载波调制传输系统</b>	<b>224</b>
6.1	引言	224
6.2	数字载波调制与解调的基本原理	225
6.2.1	数字载波调制的基本原理	225
6.2.2	数字载波调制信号的功率谱分析	227
6.2.3	数字载波调制信号解调的基本原理	229
6.3	二进制数字载波调制传输系统	232
6.3.1	2ASK 调制解调系统	232
6.3.2	2PSK 调制解调系统	242
6.3.3	2DPSK 调制解调系统	247
6.3.4	2FSK 调制解调系统	252
6.3.5	二进制调制解调系统的性能比较	258
6.4	多进制数字载波调制传输系统	259
6.4.1	信号统计判决的基本原理	261



6.4.2	MASK 调制解调系统	265
6.4.3	MPSK 调制解调系统	268
6.4.4	MQAM 调制解调系统	272
6.4.5	MFSK 调制解调系统	276
6.5	恒包络连续相位调制	280
6.5.1	MSK 调制解调系统	280
6.5.2	GMSK 调制解调系统	289
6.6	正交频分复用载波调制传输系统	298
6.6.1	并行传输的基本概念	298
6.6.2	OFDM 的基本原理	299
6.6.3	OFDM 信号的时间保护间隔与循环前缀	302
6.6.4	OFDM 信号的功率谱及 OFDM 信号的特点	303
6.7	本章小结	305
	习题	306
	主要参考文献	308
<b>第 7 章</b>	<b>传输信道</b>	<b>309</b>
7.1	引言	309
7.2	信道的定义和分类	309
7.2.1	信道的定义	309
7.2.2	恒参信道	310
7.2.3	随参信道	311
7.3	信道的损耗与衰落特性	312
7.3.1	自由空间传输损耗模型	313
7.3.2	传输路径损耗模型	313
7.3.3	传输信道阴影衰落模型	314
7.3.4	路径损耗与阴影衰落综合模型	315
7.4	信道的统计多径模型	316
7.4.1	多普勒频移与多径接收信号	316
7.4.2	窄带衰落模型	318
7.4.3	宽带衰落模型*	322
7.5	信道的容量分析	329
7.5.1	平坦衰落信道的容量	329
7.5.2	频率选择性衰落信道容量	332
7.6	信道估计与均衡	334
7.6.1	信道估计与均衡的基本概念	334
7.6.2	最大似然序列估计法*	338
7.6.3	数字时域均衡的基本原理	339
7.6.4	数字时域均衡的常用方法	341
7.6.5	自适应均衡器	345
7.7	本章小结	347
	习题	347
	主要参考文献	349
<b>第 8 章</b>	<b>差错控制编码</b>	<b>350</b>
8.1	引言	350
8.2	差错控制编码的主要类型和方式	350
8.2.1	差错控制编码的主要类型	350

8.2.2	差错控制的方式	350
8.3	简单的差错控制方法	351
8.3.1	奇偶校验码	351
8.3.2	重复码	352
8.3.3	水平奇偶校验码	353
8.4	线性分组码的代数基础*	354
8.5	线性分组码的基本性质	362
8.5.1	码距的概念	363
8.5.2	码距与检错、纠错能力的关系	364
8.5.3	线性分组码的生成矩阵与监督矩阵	366
8.5.4	线性分组码的最小码距与最小码重的关系	371
8.5.5	线性分组码的标准阵、陪集首和陪集	373
8.5.6	汉明码	375
8.5.7	线性分组码纠错能力分析	379
8.6	循环码	381
8.6.1	循环码的基本概念和定理	381
8.6.2	系统码结构的循环码	386
8.6.3	循环冗余校验码	393
8.6.4	汉明循环码	394
8.6.5	BCH 码*	396
8.7	卷积码	406
8.7.1	卷积码编码器的构造和表示方法	406
8.7.2	卷积码的卷积关系、生成矩阵与生成多项式	407
8.7.3	卷积码的监督矩阵与监督多项式矩阵	414
8.7.4	卷积码的伴随式与代数译码	416
8.7.5	卷积码的状态图、树图与网格图描述	421
8.7.6	卷积码的距离特性与转移函数	425
8.7.7	卷积码的概率译码原理	430
8.7.8	卷积码的维特比译码	433
8.7.9	维特比译码器的性能分析*	443
8.7.10	卷积码的码率变换操作——凿孔卷积码*	446
8.8	调制与编码的权衡	450
8.8.1	调制方式的权衡问题	450
8.8.2	带宽受限系统与功率受限系统	452
8.8.3	带宽与功率均受限系统	454
8.9	本章小结	458
	习题	458
	主要参考文献	460
<b>第 9 章</b>	<b>同步原理与技术</b>	<b>461</b>
9.1	引言	461
9.2	锁相环	461
9.2.1	锁相环的组成	461
9.2.2	锁相环的工作原理	462
9.2.3	锁相环的基本性能分析	463
9.3	载波同步	467
9.3.1	直接提取法	467
9.3.2	插入导频法	472

9.3.3	载波相位的似然估计法*	473
9.4	符号同步	477
9.4.1	直接提取法	477
9.4.2	插入导频法	479
9.4.3	符号同步的似然估计法*	480
9.4.4	载波相位和符号同步的联合估计*	481
9.5	帧同步	482
9.5.1	帧同步标识符的周期性插入法	483
9.5.2	帧同步标识符的相关搜索法	486
9.6	本章小结	489
	习题	489
	主要参考文献	491
<b>第 10 章</b>	<b>扩展频谱通信技术</b>	<b>492</b>
10.1	引言	492
10.2	扩频系统的基本概念	492
10.2.1	扩频系统的基本原理	492
10.2.2	扩频系统的分类	493
10.2.3	扩频系统的主要技术指标	496
10.2.4	扩频系统的特点	497
10.3	伪随机序列	498
10.3.1	m 序列	499
10.3.2	Gold 序列	503
10.4	直接序列扩频技术	505
10.5	跳频技术	506
10.5.1	跳频系统工作原理	506
10.5.2	跳频器	508
10.6	扩频系统的同步	510
10.6.1	扩频码的捕获	510
10.6.2	扩频码的跟踪	513
10.7	扩频技术的应用	515
10.7.1	扩频技术在军事通信中的应用	515
10.7.2	扩频技术在民用通信中的应用	516
10.8	本章小结	518
	习题	518
	主要参考文献	519
<b>第 11 章</b>	<b>信道复用与多址技术</b>	<b>520</b>
11.1	引言	520
11.2	频分复用与频分多址	521
11.3	时分复用与时分多址	522
11.4	码分复用与码分多址	523
11.5	空分复用与空分多址	526
11.6	统计复用与随机多址	527
11.7	综合复用	533
11.8	本章小结	534
	习题	534
	主要参考文献	534
<b>附录</b>	<b>缩写索引表</b>	<b>535</b>