



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

数字通信基础

Fundamentals of Digital Communications

仇佩亮 陈惠芳 谢磊 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

数字通信基础

Fundamentals of Digital Communications

仇佩亮 陈惠芳 谢 磊 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统论述数字通信系统物理层和链路层的主要理论与技术,在介绍数字通信概念和背景知识后,遵循通信信号分析、信道描述、模拟信号数字化和各种信道条件下的数字传输这一思路,介绍现代数字通信的基础理论和各种基本技术。在各种信道条件下可靠、有效地传输数字信息,是数字通信系统的最重要和最主要的追求目标,也是本书的重点和主线。

本书共 13 章,内容包括通信信号理论、通信信道、模拟调制技术、模拟信号数字化、数字信号的基带传输、数字信号的通带传输、通信同步技术、数字信号在衰落信道上的传输,以及各种纠错编码技术、扩展频谱技术和多用户技术等。

本书内容完整、文字简洁、条理分明、概念清楚、观点统一、易于理解,适合作为高等院校信息与通信相关专业本科生和研究生的教材或教学参考书,对于从事通信及其相关领域工作的科研人员和工程技术人员也有很高的参考价值。

本书配有教学课件(电子版),任课教师可从华信教育资源网(教育网:www.huaxin.edu.cn 或公共网:www.hxedu.com.cn)上免费注册后下载。

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

数字通信基础 / 仇佩亮, 陈惠芳, 谢磊编著. —北京: 电子工业出版社, 2007. 1
(普通高等教育“十一五”国家级规划教材)

ISBN 7-121-03365-8

I. 数… II. ①仇… ②陈… ③谢… III. 数字通信—高等学校—教材 IV. TN914.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 129039 号

责任编辑: 张来盛 zhangls@phei.com.cn 特约编辑: 石灵芝 杨琳

印 刷: 北京牛山世兴印刷厂
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: 40 字数: 1020 千字

印 次: 2007 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 5 000 册 定价: 48.00 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, 联系电话: (010) 68279077; 邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zits@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

数字通信理论与技术是一门正在迅速发展中的科学技术，几乎每年在这一领域中总有重大的新理论和新技术诞生。正是这些理论和新技术推动了通信产业的繁荣和发展。我们不能指望通过一门或几门通信课程学习就能一劳永逸地掌握通信技术。我们仅希望通过《数字通信基础》的学习，能给同学们打下一个深厚、扎实的基础，使他们能够具备自学数字通信新技术、新理论的能力，适应以后对数字通信技术开发、应用和研究的需要。

本书是在作者多年教学经验和研究实践的基础上编写而成的。我们力图以较高的理论观点和统一的处理方法来介绍数字通信传输技术，在论述中力求概念准确，思路清晰，深入浅出，理论联系实际。在内容安排上，既介绍数字通信中的基本概念和基础知识，也适当介绍近几年发展起来的新技术。

本书共有 13 章，基本上覆盖了数字传输的物理层和链路层的大部分领域，内容丰富，涉及到许多数字传输的新技术和新概念。本书可分为两大部分。第一部分包括第 1~9 章，是本书的基本部分；第二部分为第 10~13 章，包括了数字通信中几个重要的专题。本书第 1 章是绪论；第 2 章介绍了确定信号、概率和随机过程，它们是研究数字通信理论的重要数学工具；第 3 章介绍通信信道；第 4 章介绍模拟调制系统；第 5 章介绍模拟信号数字化；第 6 章介绍数字基带传输；第 7 章介绍数字通带传输；第 8 章介绍数字通信中的同步技术；第 9 章介绍基本信道编码技术；第 10 章介绍先进的信道编码技术；第 11 章介绍扩展频谱通信技术；第 12 章介绍衰落信道上的数字传输；第 13 章介绍通信中的多用户技术。

本书适合于高等院校通信、电子类专业高年级学生、硕士研究生作为教科书，也可作为从事数字通信系统设计、开发和研究人员的参考书。根据作者的经验，本书的第 1~9 章适宜作为本科生“通信原理”一学期 64 学时课程的教材；本书全部内容可以作为“数字通信基础”两学期 96 学时课程的教材，其中第 1~8 章为第一学期课程，第 9~13 章为第二学期课程。为了方便教学，本书配有电子版教学课件，任课教师可登录华信教育资源网（教育网：www.huaxin.edu.cn 或公共网：www.hxedu.com.cn）免费注册后进行下载。

几十年来，随着数字通信理论和技术的发展，国内外出版了大量的关于数字通信的著作，其中不少是优秀著作和经典名著。作者在编写本书过程中得益于对这些著作的参考，这些著作列在本书每章后的参考文献中，在此对其作者深表谢意。

本书的第 1~9 章、第 11 章和第 12 章由仇佩亮教授编写，第 10 章由谢磊副教授编写，第 13 章由陈惠芳副教授编写，全书由仇佩亮教授统稿。

限于作者的水平，书中不妥和谬误之处难免，恳请读者批评指正。

仇佩亮

2006 年 10 月于浙江大学求是村

目 录

第 1 章 绪论	(1)
§1.1 通信技术发展历史	(1)
1.1.1 电报与电话	(1)
1.1.2 无线通信	(2)
1.1.3 近 50 年来通信的发展	(2)
1.1.4 通信系统理论	(3)
§1.2 不确定性与信息量	(4)
1.2.1 消息、信号与信息	(4)
1.2.2 熵和互信息	(5)
§1.3 数字通信系统	(8)
1.3.1 基本概念	(8)
1.3.2 数字通信系统的组成	(9)
1.3.3 数字通信系统的主要性能指标	(11)
§1.4 本书结构	(12)
§1.5 小结	(13)
参考文献	(13)
习题	(14)
第 2 章 确定性信号、随机变量与随机过程	(15)
§2.1 确知信号的频域描述	(15)
2.1.1 Fourier 级数和 Fourier 变换	(15)
2.1.2 周期信号的 Fourier 变换	(21)
2.1.3 能量型信号和功率型信号	(22)
2.1.4 窄带信号(带通信号)和窄带系统(带通系统)	(24)
§2.2 随机变量	(29)
2.2.1 随机变量与分布函数	(29)
2.2.2 两个随机变量的联合分布与条件分布	(31)
2.2.3 随机变量的函数	(32)
2.2.4 随机变量的数字特征	(33)
2.2.5 几个常用的随机变量	(35)
2.2.6 切比雪夫(Chebychev)不等式与契尔诺夫(Chernof)界	(40)
§2.3 平稳随机过程	(41)
2.3.1 随机过程的定义与描述	(42)
2.3.2 平稳随机过程	(44)
2.3.3 各态历经过程(ergodic process)	(45)
2.3.4 相关函数与功率谱	(46)

2.3.5 平稳随机过程通过线性系统	(49)
2.3.6 高斯过程	(51)
2.3.7 带限过程及其采样	(52)
2.3.8 平稳带通(窄带)过程	(53)
2.3.9 正弦波加窄带高斯噪声信号	(57)
2.3.10 循环平稳过程(cyclostationary process)	(60)
§2.4 小结	(62)
参考文献	(64)
习题	(64)
第3章 通信信道	(71)
§3.1 通信信道的定义和数学模型	(71)
3.1.1 通信信道的定义	(71)
3.1.2 信道模型	(71)
§3.2 恒参信道及其特征	(73)
3.2.1 有线信道	(73)
3.2.2 无线恒参信道	(74)
3.2.3 恒参信道对信号传输的影响	(75)
§3.3 随参信道及其特征	(76)
3.3.1 随参信道举例	(76)
3.3.2 随参信道的特征及多径传输现象	(79)
§3.4 信道的加性噪声	(82)
3.4.1 加性噪声	(82)
3.4.2 信号中继转发链路分析	(84)
§3.5 信道容量与信道编码定理	(85)
3.5.1 离散无记忆信道的容量	(85)
3.5.2 高斯信道容量	(87)
3.5.3 带限信道的容量与通信的界限	(89)
§3.6 小结	(91)
参考文献	(92)
习题	(92)
第4章 模拟调制系统	(94)
§4.1 概述	(94)
§4.2 线性调制系统	(94)
4.2.1 双边带抑制载波调幅(DSB-SC AM)	(94)
4.2.2 普通调幅(AM)	(97)
4.2.3 单边带(SSB)调制	(98)
4.2.4 残留边带调幅(VSB AM, vestigial-sideband AM)	(101)
§4.3 非线性调制(角度调制)	(103)
4.3.1 一般概念	(103)

4.3.2	角调制信号的频谱特点	(104)
§4.4	线性调制系统的抗噪声性能	(105)
4.4.1	DSB-SC AM 信号相干解调的性能	(106)
4.4.2	SSB AM 信号相干解调的性能	(107)
4.4.3	普通 AM 调制的性能	(107)
§4.5	非线性调制(角调制)系统的抗噪声能力	(109)
§4.6	小结	(112)
	参考文献	(113)
	习题	(113)
第 5 章	模拟信号的数字化	(117)
§5.1	模拟信号的抽样	(117)
5.1.1	低通信号的抽样	(117)
5.1.2	带通信号的抽样	(120)
§5.2	模拟值的量化	(122)
5.2.1	均匀量化	(123)
5.2.2	最佳标量量化	(124)
5.2.3	矢量量化	(126)
5.2.4	非均匀标量量化	(128)
§5.3	脉冲编码调制(PCM)	(132)
5.3.1	PCM 的基本原理	(132)
5.3.2	自然二进制码与折叠二进制码	(133)
5.3.3	PCM 系统的噪声性能	(136)
§5.4	差分脉冲编码调制(DPCM)和增量调制(ΔM)	(137)
5.4.1	差分脉冲编码调制(DPCM)原理	(137)
5.4.2	增量调制(ΔM)	(139)
§5.5	小结	(141)
	参考文献	(142)
	习题	(142)
第 6 章	数字基带传输	(145)
§6.1	数字基带信号及其频谱特征	(145)
6.1.1	基本基带信号波形	(145)
6.1.2	数字脉冲幅度调制(PAM)信号的功率谱	(146)
6.1.3	具有多种基本脉冲波形的基带信号功率谱	(149)
§6.2	常用的数字序列码型	(151)
6.2.1	AMI (alternate mark inverse) 码	(152)
6.2.2	HDB ₃ (3 rd order high density bipolar) 码	(152)
6.2.3	双相码(Manchester 码)	(153)
6.2.4	CMI (coded mark inverse) 码	(153)
6.2.5	Miller (密勒) 码	(153)

6.2.6	$nBmB$ 码	(154)
§6.3	基带信号通过加性白高斯噪声 (AWGN) 信道传输	(154)
6.3.1	解调和检测	(154)
6.3.2	信号和噪声的矢量空间表示	(156)
6.3.3	基函数相关型解调	(160)
6.3.4	匹配滤波器	(162)
6.3.5	基函数匹配滤波型解调	(164)
6.3.6	最佳检测判决器	(166)
6.3.7	AWGN 信道上信号检测的错误 (误符号) 概率计算	(170)
§6.4	数字基带信号通过带限信道传输	(178)
6.4.1	数字信号通过带限信道传输	(178)
6.4.2	码间干扰	(180)
6.4.3	眼图	(181)
6.4.4	无码间干扰带限信号设计准则——奈奎斯特 (Nyquist) 准则	(182)
6.4.5	升余弦频谱信号	(185)
6.4.6	具有零码间干扰的数字 PAM 系统的差错概率	(186)
§6.5	部分响应系统——具有受控码间干扰的带限系统	(186)
6.5.1	双二元信号脉冲	(186)
6.5.2	带有受控码间干扰数据的检测	(188)
6.5.3	采用部分响应信号的数字 PAM 差错概率	(190)
6.5.4	其他部分响应系统	(192)
§6.6	在出现信道失真情况下的系统设计	(192)
6.6.1	信道特性已知时, 发送和接收滤波器的设计	(193)
6.6.2	信道均衡器	(195)
§6.7	小结	(201)
参考文献	(202)
习题	(203)
第 7 章	数字通带传输	(211)
§7.1	正弦波数字调制	(211)
7.1.1	正弦波数字调制信号的谱分析	(212)
7.1.2	正弦波数字幅度调制方式 (ASK)	(212)
7.1.3	正交载波幅度调制 (QAM)	(214)
7.1.4	正弦波数字相位调制 (PSK)	(215)
7.1.5	正弦波差分相位偏移键控调制 (DPSK)	(217)
7.1.6	正弦波数字频率调制	(220)
7.1.7	正交 FSK 信号及其频率间隔	(222)
7.1.8	各种调制方式的频谱利用率比较	(223)
§7.2	二元数字调制信号的相干解调	(223)
7.2.1	OOK 信号的相干解调	(224)
7.2.2	BPSK 信号的相干解调	(226)

7.2.3	DBPSK 的相干解调	(227)
7.2.4	2FSK 信号的相干解调	(228)
7.2.5	二元数字调制信号相干解调的性能比较	(230)
§7.3	M 元数字调制信号的相干解调	(230)
7.3.1	MASK 相干解调	(231)
7.3.2	MPSK 的相干解调	(232)
7.3.3	MQAM 的相干解调	(236)
7.3.4	MFSK 相干解调	(238)
7.3.5	M 元数字调制信号相干解调性能比较	(240)
§7.4	数字调制信号的非相干解调	(241)
7.4.1	OOK 信号的非相干解调	(242)
7.4.2	2FSK 信号非相干解调	(245)
7.4.3	DPSK 信号的差分相干解调 (相位比较解调)	(250)
7.4.4	二元数字调制信号的非相干解调性能比较	(252)
§7.5	连续相位调制	(253)
7.5.1	连续相位 FSK 调制 (CPFSK)	(253)
7.5.2	最小偏移键控 (MSK) 调制	(256)
7.5.3	高斯最小偏移键控 (GMSK)	(263)
7.5.4	多 h 连续相位调制	(266)
§7.6	正交频分复用调制 (OFDM)	(269)
7.6.1	OFDM 的基本模型与 DFT 实现	(270)
7.6.2	保护时间与循环前缀	(272)
7.6.3	OFDM 的符号检测与功率谱	(274)
§7.7	小结	(276)
	参考文献	(278)
	习题	(278)
第 8 章	数字通信中的同步技术	(282)
§8.1	锁相环	(282)
8.1.1	锁相环的组成和工作原理	(282)
8.1.2	加性噪声对于锁相环相位估计的影响	(285)
§8.2	载波同步	(287)
8.2.1	直接法	(287)
8.2.2	插入导频法	(291)
8.2.3	载波跟踪相位误差对解调误码率的影响	(292)
§8.3	位同步	(294)
8.3.1	开环滤波法位同步	(294)
8.3.2	闭环锁定法位同步	(296)
8.3.3	符号同步误差对误码性能的影响	(300)
§8.4	小结	(301)
	参考文献	(302)

习题	(302)
第 9 章 基本的信道编码技术	(304)
§9.1 分组纠错编码的基本概念	(304)
9.1.1 用于纠错和检错的信道编码	(304)
9.1.2 二元对称信道的差错概率和差错分布	(305)
9.1.3 检错和纠错	(306)
9.1.4 自动重发请求 (ARQ) 编码	(307)
9.1.5 最大似然译码和最小 Hamming 距离译码	(309)
9.1.6 最小 Hamming 距离与检错、纠错能力的关系	(310)
§9.2 线性分组纠错编码	(312)
9.2.1 线性分组编码的生成矩阵和校验矩阵	(312)
9.2.2 对偶码	(314)
9.2.3 线性分组码的最小 Hamming 距离和最小 Hamming 重量	(315)
9.2.4 线性分组码的译码	(317)
9.2.5 译码错误概率计算	(320)
9.2.6 二元 Hamming 码	(321)
9.2.7 从一个已知线性分组码来构造一个新的线性分组码	(322)
§9.3 线性分组码的纠错能力	(325)
§9.4 循环码的定义和性质	(328)
9.4.1 循环码定义与码字的多项式表示	(328)
9.4.2 循环码的性质	(329)
§9.5 系统循环码的编码及译码	(332)
9.5.1 系统循环码的编码	(332)
9.5.2 多项式运算的电路实现	(334)
9.5.3 循环码编码的电路实现	(338)
9.5.4 循环码的译码及其实现	(339)
§9.6 几个重要的循环码	(345)
9.6.1 Hamming 循环码	(345)
9.6.2 BCH 码	(347)
9.6.3 Reed-Solomon 码 (RS 码)	(350)
§9.7 卷积码的结构	(353)
9.7.1 卷积码的构成和代数描述	(353)
9.7.2 卷积码的图形描述和重量计数	(359)
9.7.3 卷积码的重量计数	(362)
9.7.4 恶性码	(364)
§9.8 卷积码的 Viterbi 译码算法	(365)
9.8.1 分支度量、路径度量和最大似然译码	(365)
9.8.2 Viterbi 译码算法	(368)
9.8.3 作为前向动态规划解的 Viterbi 算法	(369)
9.8.4 实现 Viterbi 译码算法的一些具体考虑	(372)

9.8.5	卷积码 Viterbi 译码算法的性能界	(374)
9.8.6	卷积码在 BSC 和 AWGN 信道上的性能	(378)
§9.9	穿孔卷积码	(380)
§9.10	小结	(383)
	参考文献	(384)
	习题	(385)
第 10 章	先进的信道编码技术	(389)
§10.1	软判决译码和软输出译码	(389)
10.1.1	软判决和软输出译码方法	(389)
10.1.2	卷积码的软输出译码	(394)
§10.2	乘积码和级联编码	(397)
10.2.1	乘积码	(397)
10.2.2	级联编码	(399)
10.2.3	交织技术	(400)
10.2.4	并行级联编码和 Turbo 码	(402)
§10.3	迭代译码技术	(404)
10.3.1	迭代译码原理	(404)
10.3.2	二维乘积码的迭代译码	(406)
10.3.3	Turbo 码的迭代译码	(410)
§10.4	LDPC 码及其软判决译码	(411)
10.4.1	Tanner 图	(412)
10.4.2	LDPC 码的构造方法	(413)
10.4.3	LDPC 的译码	(414)
§10.5	编码调制	(424)
10.5.1	多电平调制信道的信道容量	(425)
10.5.2	网格编码调制 (TCM) 的编码	(427)
10.5.3	网格编码调制 (TCM) 的译码	(430)
§10.6	小结	(432)
	参考文献	(433)
	习题	(434)
第 11 章	扩展频谱通信技术	(436)
§11.1	扩展频谱技术概述	(436)
11.1.1	扩展频谱技术的历史回顾	(436)
11.1.2	扩展频谱技术的优点	(437)
11.1.3	扩展频谱技术的分类	(438)
11.1.4	扩展频谱数字通信系统的模型	(440)
§11.2	直接序列 (DS) 扩谱通信系统	(441)
11.2.1	直接序列扩谱信号及其功率谱	(441)
11.2.2	直接序列解扩对于窄带干扰的抑制作用	(445)

11.2.3	差错概率计算	(445)
11.2.4	干扰容限 (interference margin)	(449)
11.2.5	带有编码的直接序列扩谱系统	(450)
11.2.6	脉冲干扰对于直接序列扩谱通信系统的影响	(454)
11.2.7	DS 扩谱技术的某些应用	(462)
§11.3	伪随机 (PN) 扩谱序列	(465)
11.3.1	二进制序列	(465)
11.3.2	m 序列 (最长线性移位寄存器序列)	(466)
11.3.3	m 序列的随机性质	(469)
11.3.4	m 序列波形信号的自相关函数和功率谱	(471)
11.3.5	m 序列的安全性	(472)
11.3.6	Gold 序列和 Kasami 序列	(473)
§11.4	跳频 (FH) 扩谱通信系统	(476)
11.4.1	跳频扩谱的概念	(476)
11.4.2	慢跳频扩谱系统	(478)
11.4.3	快跳频 (FFH) 扩谱系统	(480)
11.4.4	跳频扩谱的应用	(485)
§11.5	扩谱信号的捕获与跟踪	(485)
11.5.1	扩谱信号的捕获	(485)
11.5.2	扩谱信号的跟踪	(488)
§11.6	小结	(492)
	参考文献	(494)
	习题	(494)

第 12 章 衰落信道上的数字通信 (497)

§12.1	衰落信道的数学模型	(497)
12.1.1	衰落信道的随机时变脉冲响应	(497)
12.1.2	信道相关函数与功率谱密度	(498)
12.1.3	衰落信道描述函数之间关系	(501)
12.1.4	信道特征参数及其意义	(503)
12.1.5	信号特征对选择信道模型的影响	(504)
§12.2	二元信号在非频率选择性慢衰落信道上的传输	(506)
12.2.1	Rayleigh 衰落信道	(506)
12.2.2	Nakagami 衰落	(508)
12.2.3	Ricean 信道	(509)
§12.3	多径衰落信道上的分集接收技术	(510)
12.3.1	分集方式	(510)
12.3.2	分集技术中的合并方式	(511)
12.3.3	二元信号分集接收的性能分析	(515)
§12.4	频率选择性慢衰落信道上数字信号传输的 Rake 接收技术	(522)
12.4.1	抽头延时线信道模型	(522)

12.4.2	Rake 接收技术	(523)
12.4.3	Rake 接收机的性能	(524)
§12.5	编码对分集的影响	(528)
12.5.1	无编码 L 重时间分集	(528)
12.5.2	带旋转编码的时间分集	(530)
12.5.3	时间分集码设计的一般准则	(532)
§12.6	多天线分集与时空编码	(533)
12.6.1	接收分集	(534)
12.6.2	发送分集	(535)
12.6.3	空时码设计的秩准则和行列式准则	(540)
12.6.4	MIMO 系统	(541)
§12.7	小结	(543)
	参考文献	(544)
	习题	(545)
第 13 章	通信中的多用户技术	(548)
§13.1	通信资源的分配	(548)
13.1.1	FDM/FDMA	(549)
13.1.2	TDM/TDMA	(552)
13.1.3	码分多址 (CDMA)	(555)
§13.2	数字移动通信的接续技术	(558)
13.2.1	数字移动通信系统概述	(558)
13.2.2	数字移动通信系统的接续技术	(559)
§13.3	数字移动通信系统中多址技术的应用及其容量	(564)
13.3.1	空分多址	(564)
13.3.2	频分多址 (FDMA)	(571)
13.3.3	时分多址 (TDMA)	(572)
13.3.4	码分多址 (CDMA)	(573)
§13.4	直接序列码分多址	(576)
13.4.1	CDMA 信号和信道模型	(577)
13.4.2	直接序列 CDMA 的接收技术	(580)
§13.5	随机接入及其协议	(589)
13.5.1	ALOHA 系统和协议	(589)
13.5.2	载波侦听 (CSMA) 系统和协议	(596)
§13.6	小结	(598)
	参考文献	(599)
	习题	(600)
附录 A	正态积分曲线与正态积分表	(602)
附录 B	有限域代数的基本知识	(605)
附录 C	缩略语	(612)
	部分习题答案	(616)

第1章 绪 论

人类社会的发展和人类文明的进步离不开信息交互、通信技术，反过来社会进步、生产发展、科技创新则有力地推动通信技术发展。近 50 年来，由于社会对于信息交互需求的急剧增加，也由于微电子、计算机、射频、光纤等技术的进步，以及信息论、控制论等系统工程理论的创立和发展，使通信技术发生了日新月异的变化。手机、电话、电视、传真和因特网等已成为人们生活中获取信息、交流信息必不可少的工具。“通信”已成了日常生活中使用频率最高的词汇之一。

通信是信息学科的一个重要领域，“通信原理”或“通信基础”是信息与通信工程专业的基础课程，它涉及本专业许多基本概念和基础理论知识，是今后从事通信系统设计、制造与研究必须掌握的基础。

§ 1.1 通信技术发展历史

通信是一门古老的学科，自从出现了人类社会以后，人类活动就需要彼此信息交流，通信就是信息交流的工具。但在本节我们回顾的通信历史是以电的方式进行通信的技术发展历史。

1.1.1 电报与电话

对于以电方式进行通信具有明显影响的早期发明之一是 1799 年意大利科学家伏打（Volta）发明电池。这个发明使得有可能利用电能进行通信。1837 年美国人莫尔斯（Morse）发明了电报。第一条电报线路连接华盛顿和巴尔的摩，在 1844 年 5 月开始运营。莫尔斯电报编码是一种变长度编码，这种编码用短的符号序列表示常用字母，长的符号序列表示不常用字母。40 年以后，到 1875 年波特（Baudot）发展了电报编码。他采用固定长度为 5 的二进制数字序列进行编码，也就是用长度为 5 的“传号”或“空号”对字母编码，这是一种二进制数字通信。

电报历史上的一个重要里程碑是 1858 年建成的横跨欧美大陆的越洋电缆。这条电缆仅工作 4 个星期就损坏了，几年后在 1868 年 7 月铺设了第二条电缆，并开始工作。

电话发明于 19 世纪 70 年代，美国聋哑学校教师贝尔（Bell）在 1876 年申请电话发明专利，在 1877 年建立贝尔电话公司。早期的电话相当简单，仅能提供数百公里范围内的服务。在 20 世纪前 20 年中，由于发明了碳精话筒和感应线圈，使得电话质量和服务范围有了很大改进。1906 年德福莱斯特（L. DeForest）发明了电子三极管，它可以用来放大电话线上传来的微弱信号，使得电话能长距离传输。到 1915 年，电话已可以横越北美大陆传输。第二次世界大战和 20 世纪 30 年代的经济大萧条，推迟了建立越洋电话服务，直到 1953 年才铺设第一条越洋电话电缆，使得欧美之间可以通电话。

电话发展中另一个重要贡献是自动交换机的发明。1897 年斯脱劳格（Strowger）发明了第一台机电式步进制交换机，这种形式的交换机沿用了几十年。只有晶体管发明后才有

可能建立数字程控交换机。1947 年贝尔实验室的巴拉顿 (W. Brattain)、巴丁 (J. Bardeen) 和肖克来 (W. Shockley) 发明了晶体管。几年研究后, Bell 实验室于 1960 年在伊利诺斯建立了世界上第一台数字程控交换机。在过去的 50 年中, 电话通信有多项重大发展, 其中包括光纤代替电线, 数字程控交换机普遍代替古老的机电交换机。

1.1.2 无线通信

无线通信的基础是电磁场与电磁波理论。电磁理论的发展应归功于奥斯特 (Oersted)、法拉第 (Faraday)、高斯 (Gauss)、麦克斯韦 (Maxwell) 和赫兹 (Hertz) 等人的工作。

1820 年奥斯特发现电流能产生磁场, 1831 年 8 月 29 日法拉第实验证明导体做切割磁力线运动会感应出电流, 因此证明了变化的磁场会产生电场。在这些关于电磁理论的早期研究基础上麦克斯韦在 1864 年建立了电磁统一理论, 并预言电磁波存在。1883 年麦克斯韦理论被德国科学家赫兹用实验证实。

1894 年 Oliver Lodge 在英国牛津用他发明的粉末鉴波器实现了相隔 150 码 (1 码=0.9144m) 远的无线传输。但无线电报的发明应归功于马可尼 (Marconi), 他在 1895 年实现了 2km 的无线电信号传输。两年后他申请无线电报专利, 并建立无线电报与信号公司。

1900 年马可尼发明无线电话, 申请“调谐电话”专利, 他于 1901 年 12 月 12 日在加拿大纽芬兰的 Signal 小山上收到从 1 700 英里 (1 英里=1.609 km) 外的英国 Cornwall 发来的无线电信号。马可尼在 1907 年获得诺贝尔物理奖。

电子管的发明对于无线电通信有巨大影响。1904 年佛莱明 (Fleming) 发明电子二极管, 其后 1906 年德福莱斯特发明电子三极管。电子管的发明使得射频信号可以放大, 从而使得在 20 世纪初实现无线电广播。1920 年调幅 (AM) 广播在匹兹堡 KDKA 电台播出, 之后 AM 无线广播速迅遍及全球。第一台超外差 AM 接收机是由阿姆斯特朗 (Armstrong) 在第一次大战中发明的, 他的另一项发明是调频 (FM) 技术, 这是在 1933 年。但是与 AM 相比, 调频的推广较缓慢, 到第二次世界大战结束后 FM 广播才开始商用。

第一台电视机是由美国科学家 V. K. Zworykin 在 1929 年发明的。1930 年英国广播公司 (BBC) 在伦敦开播商业电视广播。5 年后美国联邦通信委员会 (FCC) 授权电视广播。

1.1.3 近 50 年来通信的发展

近 50 年来通信技术突飞猛进。继 1947 年肖克来等发明晶体管后, 1958 年基尔比 (J. Kilby) 和诺依斯 (R. Noyce) 发明集成电路, 1958 年 Townes 和 Schawlow 发明激光。这些电子学方面的进步使得有可能发展出重量轻、体积小、功耗低的高速电子电路。这些器件可用于卫星通信、宽带微波通信和光纤通信中。

1955 年 Bell 实验室的皮尔斯 (Pierce) 提出将卫星应用到通信中。早在 1945 年英国科普作家克拉克 (C. Clark) 就在一篇文章中提出过这个思想, 他提出利用地球轨道卫星作为中继站, 实现两个地面站之间的通信。1957 年苏联发射第一颗人造卫星, 这颗卫星在天上发射无线遥测信号 21 天。1956 年美国探测器 I 号卫星上天, 发送了 5 个月的遥测信号。关于通信卫星技术的主要实验是在 1962 年美国发射的 Telstar I 卫星上做的。Telstar I 卫星

由 Bell 实验室研制，他们从皮尔斯的早期工作中获得许多教益。

光纤通信的主要突破是 1966 年英国学者高昆 (K. C. Kao) 与霍克汗姆 (G. A. Hockham) 的工作。他们提出光在光纤中的损耗主要是由于光纤中的杂质引起的，而由瑞利散射所引起的固有损耗是很低的。他们预言光纤损耗可以降到 20 dB/km 以下，这个预言值比当时的实际水平 1 000 dB/km 好了不知多少个数量级。几年后美国的康宁公司研制出损耗为 20 dB/km 的光纤，从而使利用光纤进行通信成为可能。目前光纤损耗可以做到低于 0.1 dB/km。

1971 年美国 Bell 实验室的法朗基尔 (R. Frenkiel) 和恩克尔 (J. S. Engel) 提出了蜂窝网移动通信的概念；1978 年 Bell 实验室研制成功先进移动电话系统 (AMPS)，建成了世界上首个蜂窝移动通信网，使移动通信发展到一个新的水平。从此，移动通信如火如荼地发展起来。在短短 20 多年中，全球从第一代蜂窝移动通信网发展到第三代移动通信网，目前世界各国正在积极研究超三代或三代后的无线移动通信网。

1.1.4 通信系统理论

必须强调的是，通信技术发展过程中通信理论的指导作用。虽然莫尔斯发明了电报，但我们还是把奈奎斯特 (Nyquist) 在 1924 年发表的文章作为是现代数字通信的开端。奈奎斯特的研究表明，带宽为 W 的信道最多可以支持每秒 $2W$ 个符号的无码间干扰传输。鉴于奈奎斯特的的工作，哈特莱 (Hartley) 在 1928 年研究了在功率受限的带限信道上可靠地传输多电平信号所能达到的最大数据率问题。这个问题最后是由山农 (C. E. Shannon) 解决的。

通信理论中一个重大进展是由维纳 (Wiener) 在 1928 年做出的。他研究了加性噪声 $n(t)$ 中信号波形 $s(t)$ 的估计问题，即基于 $r(t)=s(t)+n(t)$ 来估计信号 $s(t)$ 。这项工作导致了维纳最优滤波理论的建立。1943 年，诺斯 (D. O. North) 提出了匹配滤波器理论，并用于加性噪声中已知信号的最佳检测，类似的工作由冯·富未克 (J. H. Van Vleck) 和密特尔顿 (D. Middleton) 在 1946 年独立提出。

1947 年前苏联学者卡捷尔尼可夫 (Kotelnikov) 在其博士论文中发展了信号的几何表示理论，并建立了信号的潜在抗干扰理论。这些方法以及后来富有成果的发展，都记录在 1965 年伍城克拉夫特 (Wozencraft) 和雅可比 (Jacorbs) 的著作中。

同时必须指出的是 20 世纪 40 年代赖斯 (O. Rice) 关于随机噪声的数学研究，他的工作为通信理论发展提供了有力的支持。

通信理论发展中最重要理论工作是由 Shannon 做出的。他在 1948 年发表的里程碑著作——《通信的数学理论》，为数字通信理论研究奠定了基础，同时建立了信息论。Shannon 利用概率方法为信源和信道建立了模型，构划了信息可靠传输的基本问题，得出了一系列重要结果。他证明，在信道带宽、功率以及噪声功率给定的情况下，信道具有固定的容量 C ，如果信源发出的信息码率 R 小于信道容量，即 $R < C$ ，则理论上可以通过适当编码达到接近无差错传输；另一方面，如果 $R > C$ ，则不管接收端和发射端对信号如何处理，都不能达到可靠通信。这个结论给当时的通信界以巨大的震动。因为当时普遍认为在信道上增加传信码率，必定会增加误码率，要达到无差错传输，只有传输码率为零，即不传输信息。Shannon 理论表明这是不对的，对每个信道都存在一个传信码率的门限，只要

传信码率在这个门限以下，都可以进行可靠通信，在这个门限以上则不行。

由于 Shannon 理论是存在性理论，它只指出存在一个界限，没有告诉如何去逼近这个界限。因此，以后就有许多学者研究各种信道编码和信源编码方法，目的是逼近 Shannon 理论的极限。格雷 (Golay) 和汉明 (Hamming) 分别在 1949 年和 1950 年提出了分组纠错编码方法，埃利斯 (Elias) 在 1955 年提出卷积码，普朗格 (Prange) 在 1957 年提出循环码。之后许多研究者就开始寻求好码和有效的译码算法。

1967 年维特比 (Viterbi) 提出对于卷积码的最大似然译码算法，即维特比算法，在通信界具有很大影响，因为维特比算法不仅适用于卷积码译码，在通信中还具有许多其他应用。

1982 年德国学者 G. Ungerboeck 提出编码调制技术，把纠错编码与调制技术相结合。1993 年法国学者 Perrou 和 Glavieux 提出 Turbo 码，这种码的性能与 Shannon 极限仅差 0.7 dB。近年来许多学者研究的低密度校验码 (LDPC)，它与 Shannon 极限仅差 0.03 dB。LDPC 码早在 20 世纪 60 年代由美国学者 Gallager 提出，到 90 年代又被重新发现。

通信中的许多新技术，如多载波调制技术、扩谱技术、多天线 MIMO 技术以及多用户接入技术，它们的提出和发展均是在 Shannon 信息论的指导下进行的。

§ 1.2 不确定性与信息量

通信的目的在于把信息从空间某处传到另一处，实现信息的传输。那么什么叫信息呢？信息如何来衡量呢？本节对此作一些说明。

1.2.1 消息、信号与信息

首先我们先解释几个在通信中常见的术语和概念。

1. 信源和信宿

信源是产生消息的源泉，或者说是消息的产生者，比如演讲者，演播室，各种传感器等等。而信宿是消息的接收者，消息的归宿。信宿可以是人，也可以是机器等。

2. 消息

消息是信源的输出，也是通信传输的对象，比如语音，视频图像，文本以及各种物理参量等。

3. 信号

信号是承载消息的电流、电压波形，在光通信中信号是承载消息的光强度等。消息荷载在信号上，被传输，被处理。由于信号在传输中会受到各种干扰和失真，使得从接收到信号中恢复消息会发生差错。

4. 信息

信息是一个抽象的量，它不像消息、信号那样是一个物理实体，但是它是消息的灵魂和本质。一条消息有意义就在于它含有大量的信息。冗长的文章空洞无物，就表明这篇文