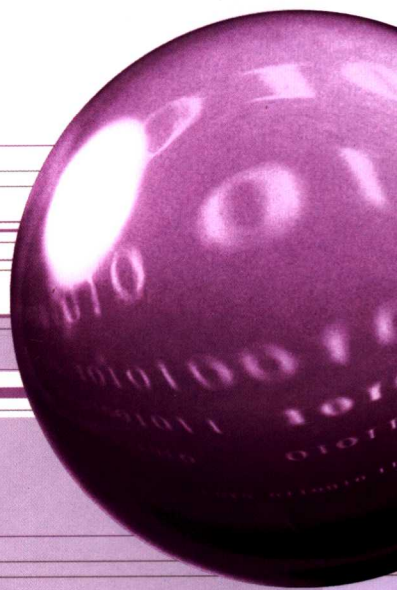


新编21世纪高等职业教育电子信息类规划教材·通信技术专业



数字通信 原理与技术

陶亚雄 主 编
朱国权 副主编
王 坚 主 审



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

新编 21 世纪高等职业教育电子信息类规划教材·通信技术专业

数字通信原理与技术

陶亚雄 主 编

朱国权 副主编

王 坚 主 审

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本教材根据教育部关于高等职业技术学院通信专业的教学大纲编写。全书共九章,介绍了数字通信中的基本概念和技术,数字通信系统在各种问题下的实际应用技术,数字通信系统的各级同步体系、措施和原理;扩频通信系统的原理、直接序列扩频通信系统、跳频扩频通信 FH 系统的原理、技术;复用、时分复用 TDMA 技术的原理、结构和特点,PCM30/32 路基群、高次群的复接原理、方式及其帧结构,以及 SDH 的帧结构、复接原理及优点,几个最常用协议(如 OSI、TCP/IP、X.25、WAP 等)的体系架构及其原理和应用,以及数据异步传输模式 ATM 的基本理论、ATM 信元结构、协议模型及功能、交换结构及特点等。

该书在每章后面附有小结和大量多种类型(单选、多选、填空、判断、计算、画图等)的练习,旨在促进读者思考、理解有关基本原理与概念,全面加深和完善读者对核心技术的学习和掌握。

本书极力淡化枯燥的理论分析,尽量结合实际通信系统进行原理阐述,并配有大量的插图说明,浅显易懂。既可作为高职通信、电子和网络类专业的教材,也可用作本科电类学生以及工程技术人员的相关参考书籍。

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

数字通信原理与技术/陶亚雄主编. —北京:电子工业出版社,2006.7
新编 21 世纪高等职业教育电子信息类规划教材·通信技术专业
ISBN 7-121-02876-X

I. 数… II. 陶… III. 数字通信—高等学校:技术学校—教材 IV. TN914.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 076993 号

责任编辑:陈晓明 特约编辑:李双庆

印 刷:北京市铁成印刷厂

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

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:16.75 字数:429 千字

印 次:2006 年 7 月第 1 次印刷

印 数:5 000 册 定价:23.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,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。质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

出版说明

高等职业教育是我国高等教育体系的重要组成部分，也是我国职业教育体系的重要组成部分。社会需求是职业教育发展的最大动力。根据劳动市场技能人才的紧缺状况和相关行业人员资源需求预测，教育部会同劳动和社会保障部、国防科工委、信息产业部、交通部、卫生部启动了“职业院校制造业和现代服务业技能型紧缺人才培养培训工程”，明确了高等职业教育的根本任务是要从劳动力市场的实际需要出发，坚持以就业为导向，以全面素质为基础，以能力为本位，把提高学生的职业能力放在突出的位置，加强实践教学，努力造就数以千万计的制造业和现代服务业一线迫切需要的高素质技能型人才，并且优先确定了“数控技术应用”、“计算机应用与软件技术”、“汽车运用与维修”、“护理”等四个专业领域，在全国选择确定 200 多所高职院校作为承担技能型紧缺人才培养培训工程示范性院校，其中计算机应用与软件技术专业 79 所，软件示范性高职院校 35 所，数控技术应用专业 90 所，汽车运用与维修专业 63 所。为加快实施技能型人才培养培训工程，教育部决定：在 3~5 年内，高职院校学制要由 3 年逐步改为 2 年。

为了适应高等职业教育发展与改革的新形势，电子工业出版社在国家教育部、信息产业部有关司局的支持、指导和帮助下，进行了调研，探索出版符合高等职业教育教学模式、教学方法、学制改革的新教材的路子，并于 2004 年 4 月 3~13 日在南京分别召开了“计算机应用与软件技术”、“数控技术应用”、“汽车运用与维修”等 3 个专业的教材研讨会。参加会议的 150 多名骨干教师来自全国 100 多所高职院校，很多教师是双师型的教师，具有丰富的教学经验和实践经验。会议根据教育部制定的 3 个专业的高职两年制培养建议方案，确定了主干课程和基础课程共 60 个选题，其中，“计算机应用与软件技术专业” 30 个；“数控技术应用专业” 12 个；汽车运用与维修专业 18 个。

这批教材的编写指导思想是以两年制高等职业教育技能型人才为培养目标，明确职业岗位对专业核心能力和一般专业能力的要求，重点培养学生的技术运用能力和岗位工作能力，并围绕核心能力的培养形成系列课程链路。教材编写注重技能性、实用性，加强实验、实训、实习等实践环节。教材的编写内容和学时数较以往教材有根本的变化，不但对教材内容系统地进行了精选、优化和压缩，而且适当考虑了相应的职业资格证书的课程内容，有利于学生在获得学历证书的同时，顺利获得相应的职业资格证书，增强学生的就业竞争能力。为了突出教学效果，这批教材将配备电子教案，重点教材将配备多媒体课件。

这批教材按照两年制高职教学计划编写。第一学期教学所用的基础教材将于 2004 年 9 月前出版。第二学期及之后的教材大部分将于 2004 年 12 月前出版。这批教材是伴随着高等职业教育的改革与发展而问世的，可满足当前两年制高等职业教育教学的需求，教材所存在的一些不尽如人意之处，将在今后的教学实践中不断修订、完善和充实。我们将在教育部和信息产业部的指导和帮助下，一如既往地依靠业内专家，与科研、教学、产业第一线人员紧密结合，加强合作，与时俱进，不断开拓，为高等职业教育提供优质的教学资源和服务。

电子工业出版社

高等职业教育教材事业部

2004 年 8 月

参与编写“高等职业院校国家技能型紧缺人才培养培训工程 规划教材”的院校及单位名单

吉林交通职业技术学院
长春汽车高等专科学校
山西交通职业技术学院
湖南交通职业技术学院
云南交通职业技术学院
南京交通职业技术学院
陕西交通职业技术学院
浙江交通职业技术学院
江西交通职业技术学院
福建交通职业技术学院
南京工业职业技术学院
浙江工贸职业技术学院
四川职业技术学院
郴州职业技术学院
浙江师范大学高等技术学院
辽宁铁岭农业职业技术学院
河北承德石油高等专科学校
邢台职业技术学院
保定职业技术学院
武汉工交职业学院
湖南生物机电职业技术学院
大庆职业学院
三峡大学职业技术学院
无锡职业技术学院
哈尔滨工业大学华德应用技术学院
长治职业技术学院
江西机电职业技术学院
湖北省襄樊机电工程学院
河南漯河职业技术学院
吉林电子信息职业技术学院
陕西国防工业职业技术学院
天津中德职业技术学院
河南机电高等专科学校
平原大学
苏州工业园区职业技术学院
九江职业技术学院
宁波大红鹰职业技术学院
无锡轻工职业技术学院
江苏省宜兴轻工业学院
湖南铁道职业技术学院
顺德职业技术学院
广东机电职业技术学院
常州机电职业技术学院
常州轻工职业技术学院
南京工程学院数控培训中心
上海市教育科学研究院
深圳职业技术学院
深圳信息职业技术学院
湖北轻工职业技术学院
上海师范大学
广东技术师范学院
包头职业技术学院
山东济宁职业技术学院
无锡科技职业学院
钟山学院信息工程系
合肥通用职业技术学院
广东轻工职业技术学院
山东信息职业技术学院
大连东软信息技术学院
西北工业大学金叶信息技术学院
福建信息职业技术学院
福州大学工程技术学院
江苏信息职业技术学院
辽宁信息职业技术学院
华北工学院软件职业技术学院
南海东软信息技术职业学院
天津电子信息职业技术学院
北京信息职业技术学院

安徽新华学院
安徽文达信息技术职业学院
杭州电子工业学院软件职业技术学院
常州信息职业技术学院
武汉软件职业学院
长春工业大学软件职业技术学院
淮安信息职业技术学院
上海电机高等专科学校
安徽电子信息职业技术学院
上海托普信息技术学院
浙江工业大学
内蒙古电子信息职业学院
武汉职业技术学院
南京师范大学计算机系
苏州托普信息技术学院
北京联合大学
安徽滁州职业技术学院
新疆农业职业技术学院
上海交通大学软件学院
天津职业大学
沈阳职业技术学院
南京信息职业技术学院
南京四开电子有限公司
新加坡 MTS 数控公司
上海宇龙软件工程有限公司
北京富益电子技术开发公司
安徽职业技术学院
河北化工医药职业技术学院
河北工业职业技术学院
河北师大职业技术学院
北京轻工职业技术学院
成都电子机械高等专科学校
广州铁路职业技术学院
广东番禺职业技术学院
桂林电子工业学院高职学院
桂林工学院
河南职业技术师范学院
黄冈职业技术学院
黄石高等专科学校

湖北孝感职业技术学院
湖南信息职业技术学院
江西蓝天职业技术学院
江西渝州科技职业技术学院
江西工业职业技术学院
柳州职业技术学院
南京金陵科技学院
西安科技学院
西安电子科技大学
上海新侨职业技术学院
四川工商职业技术学院
绵阳职业技术学院
苏州经贸职业技术学院
天津渤海职业技术学院
宁波高等专科学校
太原电力高等专科学校
无锡商业职业技术学院
新乡师范高等专科学校
浙江水利水电专科学校
浙江工商职业技术学院
杭州职业技术学院
浙江财经学院信息学院
台州职业技术学院
湛江海洋大学海滨学院
天津滨海职业技术学院

前 言

本教材是贯彻教育部关于高等职业技术教育应适当减少理论教学深度、强化实际动手能力训练、培养新一代综合应用型人才的精神，按照教育部颁发的高等职业技术教育电子与通信类专业主干专业课程“数字通信原理”的最新教学大纲编写。

本教材在内容选取、章节顺序安排以及编写方面，具有如下几个特点：

1. 充分考虑了高职学生的文化基础和学习能力，文字上力求浅显通俗，并适当增加了一些示意性的插图和例题，以帮助学生更好地理解教材内容；
2. 内容选取上更强调针对性和实用性，尽量避免本课程中易于泛泛而谈的情况；教学内容尽可能体现数字通信系统中采用的新知识、新技术和新趋势；
3. 教学内容和思考练习中，重在突出基本概念和性质的掌握，以及系统地培养学生科学的思维方法和学习能力；
4. 每章之后都附有大量形式多样的习题，对本章内容进行重点训练，加深学生的理解和掌握。

本教材共九章，可分为基本知识（1、2、3、4章）、实用技术（5、6、7章）、数据通信方式和协议（8、9章）三个部分。前四章介绍了数字通信系统中的基本知识（如常用频带调制技术、信息度量、信源编码、信道编码、最佳接收机、部分响应信号等）。在此基础上，后续三章依次详细介绍了数字通信系统的各级同步体系、措施和原理；扩频通信系统的原理、直接序列扩频通信系统、跳频扩频通信 FH 系统的原理、技术；复用、时分复用 TDMA 技术的原理、结构和特点，PCM30/32 路基群、高次群的复接原理、方式及其帧结构，以及 SDH 的帧结构、复接原理及优点。

最后两章分别介绍目前数据通信网络中，几个最常用协议（如 TCP/IP、X.25、ATM、WAP 等）的体系架构及其原理和应用；数据异步传输模式 ATM 的基本理论、信元结构、协议模型及功能、ATM 的逻辑连接、交换结构及特点等。

本课程参考学时为 80 学时，是通信、电子类教学用书，同时也可作为计算机通信、网络类专业相关课程的教学用书，还可作为相关工程技术人员的参考用书。

本教材由重庆职业技术学院副教授陶亚雄博士主编。其中第 3、5、8 章分别由上海建峰职业技术学院谭艺、上海农林职业技术学院沈惠惠、武汉理工大学谭京华博士编写，重庆职业技术学院袁勇、董春山、李林、何壁贵分别参与了第 2、9、6、4 章部分章节的编写工作；其余内容由陶亚雄和朱国权编写并统稿。

本教材在编写过程中得到了各位参编老师及其所在院校领导的大力支持和帮助，在此表示由衷的感谢；同时也对提供大量文献参考资料的专家学者，尤其是主审本书的同济大学王坚教授的辛勤劳动和认真指点表示诚挚的谢意。

由于编者水平所限，疏漏甚至错误之处在所难免，欢迎读者批评指正。

编 者

2006 年 3 月



作者简介：

陶亚雄，副教授，1967年7月出生，出生于重庆市北碚区。先后就读于华中理工大学电信学院无线电专业、同济大学电信学院信号与信息处理专业、同济大学CIMS研究中心。曾从事军用微波接力通信设备设计研发，以及电子、信息、通信专业高职及本科教学工作，在电子通信领域具有较强的科研能力与丰富的教学经验。



目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 数字通信的概念及其发展	(1)
1.1.1 数字通信系统的模型和特点	(1)
1.1.2 数字通信系统的发展	(4)
1.2 数字通信系统的性能	(7)
1.2.1 数字通信的有效性	(7)
1.2.2 数字通信的可靠性	(8)
1.3 数字通信信道	(8)
1.3.1 数字通信信道概述	(8)
1.3.2 数字通信的频道划分	(10)
习题 1.....	(11)
第 2 章 基带数字通信	(13)
2.1 随机过程	(13)
2.1.1 随机过程的统计平均和功率谱密度	(13)
2.1.2 线性时不变系统对随机输入信号的响应	(18)
2.1.3 离散时间随机信号	(20)
2.2 数字基带信号	(21)
2.2.1 基带信号的基本概念	(21)
2.2.2 二元码	(22)
2.2.3 三元码	(24)
2.3 脉冲编码调制 PCM	(25)
2.3.1 抽样	(25)
2.3.2 量化	(28)
2.3.3 编码	(31)
2.4 数字基带传输系统及其误码率	(33)
2.4.1 基带传输系统模型	(33)
2.4.2 基带传输系统的误码率	(33)
2.5 带限信道的信号设计和编码	(35)
2.5.1 网格码	(35)
2.5.2 无码间干扰的带限信号设计	(37)
2.6 线性均衡	(42)
2.6.1 线性横向均衡滤波器	(44)
*2.6.2 峰值失真准则	(45)
*2.6.3 均方误差 (MSE) 准则	(46)
*2.6.4 基带和带通线性均衡器	(46)

本章小结	(48)
习题 2	(48)
第 3 章 数字编码	(53)
3.1 信源编码	(53)
3.1.1 信息的度量	(53)
3.1.2 离散信源编码	(54)
3.1.3 模拟信源编码	(55)
3.2 信道容量	(55)
3.2.1 信道容量	(55)
3.2.2 香农公式	(56)
3.3 差错控制编码	(57)
3.3.1 差错控制编码的概念	(57)
3.3.2 差错控制技术	(57)
3.4 几种差错控制编码简介	(60)
3.4.1 奇偶监督码	(60)
3.4.2 行列监督码	(60)
3.4.3 线性分组码	(60)
3.4.4 卷积码	(61)
3.4.5 编码交织	(66)
3.5 数字压缩编码	(70)
3.5.1 压缩编码的概念	(70)
3.5.2 几种压缩编码法	(72)
3.5.3 MPEG 标准	(75)
习题 3	(78)
第 4 章 数字信号的频带传输	(84)
4.1 基本数字调制信号	(84)
4.1.1 二进制数字调制	(84)
4.1.2 多进制数字调制	(86)
4.2 最小频移键控和高斯滤波最小频移键控	(91)
4.2.1 最小频移键控 MSK	(91)
4.2.2 高斯滤波最小频移键控 (GMSK)	(93)
4.3 频带数字信号的无线传播	(94)
4.3.1 时变多径信道特性	(94)
4.3.2 分集接收技术	(96)
4.4 最佳接收机	(99)
4.4.1 最大输出信噪比准则和匹配滤波接收机	(100)
4.4.2 最小均方误差接收机	(100)
4.4.3 最小错误概率接收	(101)
4.4.4 最大后验概率接收	(102)

习题 4	(102)
第 5 章 数字通信系统的同步	(106)
5.1 载波同步	(106)
5.1.1 载波的直接提取与恢复	(106)
5.1.2 载波的间接提取与恢复	(110)
5.1.3 载波同步系统的性能指标	(112)
5.2 位同步	(113)
5.2.1 外同步法	(113)
5.2.2 直接法	(114)
5.2.3 位同步系统的性能	(116)
5.3 群同步	(119)
5.3.1 连贯插入法	(120)
5.3.2 间隔式插入法	(121)
5.3.3 群同步系统的性能	(123)
5.4 网同步	(125)
5.4.1 网同步的发展和必要性	(125)
5.4.2 数字同步网原理	(126)
5.4.3 GPS 时钟在数字同步网中的应用	(128)
本章小结	(132)
习题 5	(133)
第 6 章 多址技术与 CDMA 通信系统	(138)
6.1 多址技术	(138)
6.2 扩频通信技术	(140)
6.2.1 扩频数字通信系统的模型	(140)
6.2.2 直接序列扩频通信	(142)
6.2.3 脉冲干扰对 DS 扩频系统的影响	(146)
6.2.4 PN 码序列的生成	(147)
6.3 跳频扩频信号	(151)
6.4 扩频系统的同步	(152)
6.4.1 同步建立或捕捉	(153)
6.4.2 同步跟踪	(155)
6.5 其他类型的扩频信号	(156)
6.5.1 跳时扩频信号	(156)
6.5.2 混合扩频方式	(156)
习题 6	(157)
第 7 章 数字复用与复接	(162)
7.1 复用技术	(162)
7.2 PCM 时分多路复用	(165)
7.2.1 PCM 时分多路复用信号的帧结构	(165)

7.2.2	30/32 路 PCM 基群终端机	(167)
7.2.3	30/32 路 PCM 基群终端机中的定时与同步系统	(168)
7.3	数字复接技术	(168)
7.3.1	PCM 复接系列	(168)
7.3.2	复接原理	(169)
7.3.3	复接方式	(170)
7.3.4	码速调整方式	(171)
7.4	PCM 的高次复接	(171)
7.4.1	二次群同步复接	(171)
7.4.2	二次群准同步复接	(173)
7.4.3	高次群的帧结构	(176)
7.5	同步数字体系 (SDH)	(176)
7.5.1	PDH 和 SDH 概述	(176)
7.5.2	SDH 帧结构	(178)
7.5.3	SDH 的同步复接原理	(179)
7.6	数字交叉连接 DXC	(181)
7.6.1	DXC 基本原理	(181)
7.6.2	DXC 的应用配置	(182)
	习题 7	(183)
第 8 章	网络通信和协议	(189)
8.1	计算机网络通信	(189)
8.1.1	网络通信的任务	(190)
8.1.2	数据通信网络的构成与分类	(191)
8.2	通信协议体系	(192)
8.2.1	协议体系结构的必要性	(192)
8.2.2	基本协议体系结构——三层模型	(193)
8.2.3	协议数据单元 PDU	(194)
8.3	OSI 七层协议	(196)
8.3.1	OSI 标准协议体系结构——OSI 七层模型	(196)
8.3.2	OSI 的数据传输过程	(201)
8.4	TCP/IP 协议体系结构	(202)
8.4.1	TCP/IP 协议体系结构	(203)
8.4.2	TCP 和 IP 的功能	(203)
8.4.3	TCP/IP 的操作过程	(205)
8.4.4	TCP/IP 协议族	(207)
8.4.5	IPv6	(208)
8.5	X.25 协议	(210)
8.5.1	网络交换技术简介	(210)
8.5.2	X.25 简介	(214)

8.5.3	X.25 和电路交换的性能分析	(216)
8.6	帧中继	(218)
8.6.1	帧中继简介	(218)
8.6.2	帧中继技术	(219)
8.6.3	帧中继网络	(220)
8.7	WAP 协议	(222)
8.7.1	WAP 协议简介	(222)
8.7.2	WAP 的结构体系	(223)
8.7.3	WAP 的回顾与展望	(226)
习题 8	(227)
第 9 章	ATM 异步传输模式	(234)
9.1	ATM 基本概念	(234)
9.2	ATM 信元	(235)
9.2.1	ATM 信元的结构	(235)
9.2.2	ATM 信元	(237)
9.3	ATM 的逻辑连接	(238)
9.3.1	VPI 和 VCI	(238)
9.3.2	ATM 的逻辑连接	(239)
9.4	ATM 协议	(241)
9.4.1	ATM 协议参考模型	(241)
9.4.2	ATM 协议的层次划分	(242)
9.4.3	ATM 协议模型的作用	(245)
9.4.4	ATM 标准	(245)
9.5	ATM 交换	(245)
9.5.1	ATM 的错误检验与时延	(245)
9.5.2	ATM 交换结构	(246)
9.6	ATM 技术应用举例——LANE	(249)
习题 9	(250)
习题答案	(254)

第1章 绪 论

现代通信从模拟通信方式开始，但数字通信后来居上，其应用越来越广泛，已逐步取代了模拟通信。本章主要介绍数字通信的基本概念及其发展简史、发展趋势、频段划分等问题，为本书后续篇章关于数字通信原理与技术的学习打下基础。

1.1 数字通信的概念及其发展

随着通信技术、计算机技术和控制技术的不断发展与相互融合，通信的功能得到极大扩展，成为推动人类社会进入信息时代的主要技术之一。数字通信系统就是传输和处理数字信号的系统，可再细分为数字基带和频带传输系统。目前各种现代通信系统中，数字通信系统由于其固有的特点而占据绝对优势。

1.1.1 数字通信系统的模型和特点

1.1.1.1 数字通信系统模型

尽管数字通信系统种类繁多，形式各异，但它们都是完成将数字信号从一端传送到另一端的信号交换/处理系统，由一整套相应的技术设备和传输媒介构成，可以用图 1.1 所示的统一模型来表示。

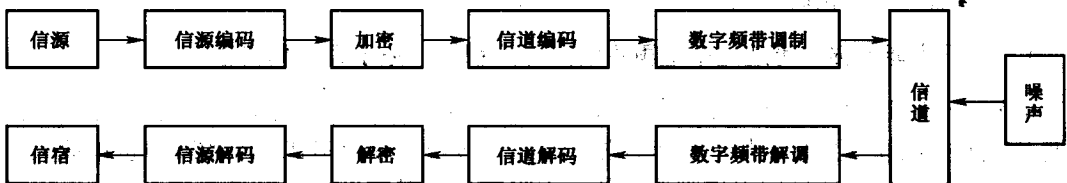


图 1.1 数字通信系统模型

从图中可以看出，数字通信系统包括信源/宿、信源编/解码、加/解密、信道编/解码、频带调制/解调、信道以及噪声源共十二个组成模块。其中信道以前上半部分的五个模块构成系统的发送部分，常称为发送机或发信机；相应的，下半部分则是接收机。

信源是信息的发出者，信宿是信息的接收者。如果系统是双工的，则信源同时也是信宿。信源把信息变换成原始电信号，如产生模拟信号的电话机、摄像机和输出数字信号的电子计算机以及各种数字终端设备等。

由于原始数字信息中存在大量冗余，信源编码的主要任务就是压缩这些冗余，提高信道的传输效率。此外，如果信源是模拟信源，则还要首先把模拟信号变换成数字信号（一般以二进制信号为主），即通常所说的 A/D 变换。

加密器对数字信号进行加密，通常是对信号进行一些逻辑运算来实现加密功能。

信道编码主要包括纠错编码和码型变换两个过程。纠错编码使发送信号中增加一定的冗余码元，这些冗余码元和传送信息之间存在一定的逻辑控制关系，当信息传输过程中出现错误时，接收端可通过一定的校验方法发现并纠正部分差错。码型变换则是为了使信道编码后的数字信号适合于在信道中传输。

为适应信道传输的频带要求，一般都要将编码后的数字基带信号调制到高频范围内，这个过程就是数字频带调制，具体的数字调制技术有幅度键控、频移键控、相移键控等多种方式。数字通信中，也有对未经频带调制的数字信号直接送入信道进行传送的情况，这就是数字基带传输，其信号就是数字基带信号。

信道是所有信号传输媒介的总称，分为有线和无线信道两大类。双绞线、电缆、同轴电缆和光纤等就属于有线信道，而传输电磁信号的自由空间则是无线信道。其中除有线电视可以直接传输数字基带信号外，其他各种信道都要求信号具有较高的频率。因此，在这些信道上传输的数字信号都必须经过一次频带调制，将基带信号搬迁到适合于信道传输的频带上。

数字信号的传输过程中，不可避免地会受到系统外部以及内部的各种干扰，如电阻热噪声等。虽然噪声一般都由消息的产生环境、传输系统的电子设备、传输信道以及各种接收设备等信号传输所经环节中的一个或几个中产生，为分析方便起见，通常把所有的干扰折合到信道上，用一个等效噪声源来表示，如图 1.1 中所示。

接收端包含与发送端完全对应的解调、信道解码、解密、信源解码等功能模块，分别完成与发送端相应部分的逆向功能，这里不再赘述。

需要说明的是，实际的具体数字通信系统并非一定要包括上述模型图里的所有模块，如系统没有通信保密要求时，就不需要加密和解密模块。

1.1.1.2 数字通信系统的特点

与模拟通信系统相比，数字通信主要具有如下特点。

1. 抗干扰能力强，可通过中继再生消除噪声积累，适于远距离传输

信号在传输过程中必然会受到各种噪声的干扰。模拟通信系统中，为了实现远距离传输，需要及时地把已经受到衰减的信号进行放大，这个过程将使得串扰进来的噪声也被放大。由于模拟信号是用信号的幅度来携带信息的，而噪声直接对信号幅度形成干扰，因此，很难完全把信号与噪声分开。随着传输距离的增加，噪声的累加影响也越来越大，系统接收端收到的信号功率和噪声功率之比（即信噪比）越来越小，恢复还原原始发送信号的差错率就越大。所以模拟通信系统的通信质量随着距离的增加而下降。

在数字通信系统中，信息不是包含在脉冲的波形上，而是包含在脉冲的有无之中。为了实现远距离传输，可以通过再生的方法对已经失真的信号波形进行判决，从而消除噪声积累。由于噪声的影响无法积累，所以数字通信抗干扰能力强，易于实现高质量的远距离传输。

此外，数字通信系统还采用差错控制编码技术，使接收端可以发现甚至纠正错误，大大提高了系统通信的可靠性。

2. 便于实现加密处理，通信保密性强

数字通信系统对传输信号的加密处理比模拟系统容易得多，只需经过一些简单的逻辑运

算即可实现，容易满足信息传输安全性和保密性要求。我们来看图 1.2 所示的情况。

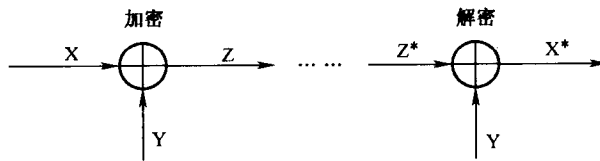


图 1.2 数字通信系统加密过程示意

图中，X 为原始输入数字信号，Y 为密码。在发送端将二者进行异或（同或、与或非等逻辑关系均可）运算，输出信号 Z 就是经过加密的信号，它和原始信号 X 显然不同。接收端收到该加密信号 Z* 后，将它和 Y 再送入异或电路进行解密即异或运算，其输出信号 X* 即还原为原数字信号 X。该过程的数据变换过程如表 1-1 所示。显然，只要双方约定实施加密的逻辑关系（本例中为异或）以及加密的密码序列 Y，且 Y 的周期足够长，则第三者就很难破译。此外，为提高系统的抗破解能力，还可以按需要随时或周期性地变换密码，加大破译难度。

表 1-1

序 列	发 送 端	序 列	接 收 端
输入 X	1 1 0 1 0 1 1 0 0 1 0 1 0 0	接收 Z*	1 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 0 0 1 1
密码 Y	0 1 0 1 0 0 1 1 0 1 0 1 1 1	密码 Y	0 1 0 1 0 0 1 1 0 1 0 1 1 1
加密后的 Z	1 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 1	解密后的 X*	1 1 0 1 0 1 1 0 0 1 0 1 0 0

以上介绍的只是简单的加密原理，实际的加密方案要复杂得多。由此可知，数字通信加密十分容易，且保密效果不错。

3. 数字通信系统易于集成化，体积小、重量轻、可靠性高

数字通信一般都采用时分多路复用技术，不需要昂贵而体积较大的滤波器。此外，数字通信设备中大多电路都已集成化，可以用大规模、超大规模集成电路实现。所以设备体积小，功耗低。

4. 灵活性高，可适应多种业务要求

在数字通信中，各种消息（如电报、电话、图像和数据等）都被转化为统一的二进制数字信号进行传输，使各种业务的不同形式数字信号可以集中起来，以时分复用方式组成综合业务数字信号进行交换、传输、处理、存储和分离，节省频带，极大地提高了频带利用率，降低了传输费用。

5. 便于与计算机连接

由于数字通信系统中的信号以二进制数字信号为主，与数字电子计算机所采用的信号完全一致，所以数字通信线路可以很方便地与计算机连接，实现许多复杂的自动控制和数据处理功能。如由雷达、数字通信设备、计算机及导弹系统组成的自动化空防系统，就是通过计

算机对整个数字通信网络进行高度智能化的监测。

但是，数字通信方式也有不足之处，其中最突出的就是占用频带宽。如一路模拟电话信号只占用 4kHz 带宽，而一路数字电话信号却大约需要 64kHz 的带宽。不过，随着编码技术的改进，数字电话的带宽也在不断下降，现在已可做到 16kHz。目前，由于高频率、短波长通信技术的不断发展和完善，光纤等宽带传输信道的逐步采用，数字通信在带宽问题上的缺陷已基本得到解决。

1.1.2 数字通信系统的发展

1.1.2.1 数字通信的发展历程

最早的电通信系统是 S·莫尔斯 (Samuel Morse) 研制的电报传输系统，它实际上是一个数字通信系统，并在 1837 年进行了演示试验。莫尔斯设计了一种可变长度的二进制码，将常用的字母用短码字表示，不常用的字母则用较长的码字来表示。显然，这就是现代通信中信源编码压缩冗余量的基本思想起源，为世界上第一个数字通信系统的研制起到了重要作用。

但是，现在通常意义上的数字通信系统源于奈奎斯特 (Nyquist) 的研究，他提出了给定带宽的电报信道上无码间干扰的最大传输速率，还用公式表达了一个电报系统的模型，并给出了发送信号的一般表达形式。奈奎斯特还提出了最佳带限脉冲信号的形状及其抽样时刻无码间干扰条件下的最大比特率，即奈奎斯特速率。

在奈奎斯特的研究基础上，哈特利 (Hartley) 研究了多幅度电平在带限信道上实现可靠数据传输的问题，指出了最大信号幅度、幅度分辨率和带限信道最大传输数据速率之间的关系。

科尔莫哥洛夫 (Kolmogorov) 和维纳 (Winer) 研究了加性噪声对信号接收的影响，提出了最佳线性 (Kolmogorov-Winer) 滤波器的概念。

在哈特利和奈奎斯特的研究基础上，香农 (Shannon) 进行了开创性的研究，提出了著名的香农公式，开辟了信息研究的新领域。

在此之后，汉明 (Hamming) 对数据编码的纠错能力研究获得了重大成果，并激发了众多科研工作者，相继研发出多种功能强大的抗干扰编码技术，为现代数据通信的发展做出了突出贡献。

借助香农和汉明等人的研究成果，数字通信领域的研究不断深入，又有了许多新的发明和进展。一些近期的著名研究成果如下：

- 穆勒 (Muller, 1954 年)、里德 (Reed, 1954 年)、所罗门 (Reed 和 Solomon, 1960 年)、鲍斯和雷-乔德赫里 (Bose 和 Ray-Chaudhuri, 1960 年) 和歌帕 (Groppa, 1971 年) 等人研究开发了新的分组码。

- 福尼 (Forney, 1966 年) 发明了级联码。

- 沃曾克拉夫特和瑞峰 (Wozencraft 和 Reiffen, 1961 年)、法诺 (Fano, 1963 年)、齐岗吉诺夫 (Zigangirov, 1966 年)、杰利内克 (Jelinek, 1969 年)、福尼 (Forney, 1970 年、1972 年和 1974 年) 和维特比 (Viterbi, 1967 年、1971 年) 对卷积码及其译码算法的发展做出了重要贡献。