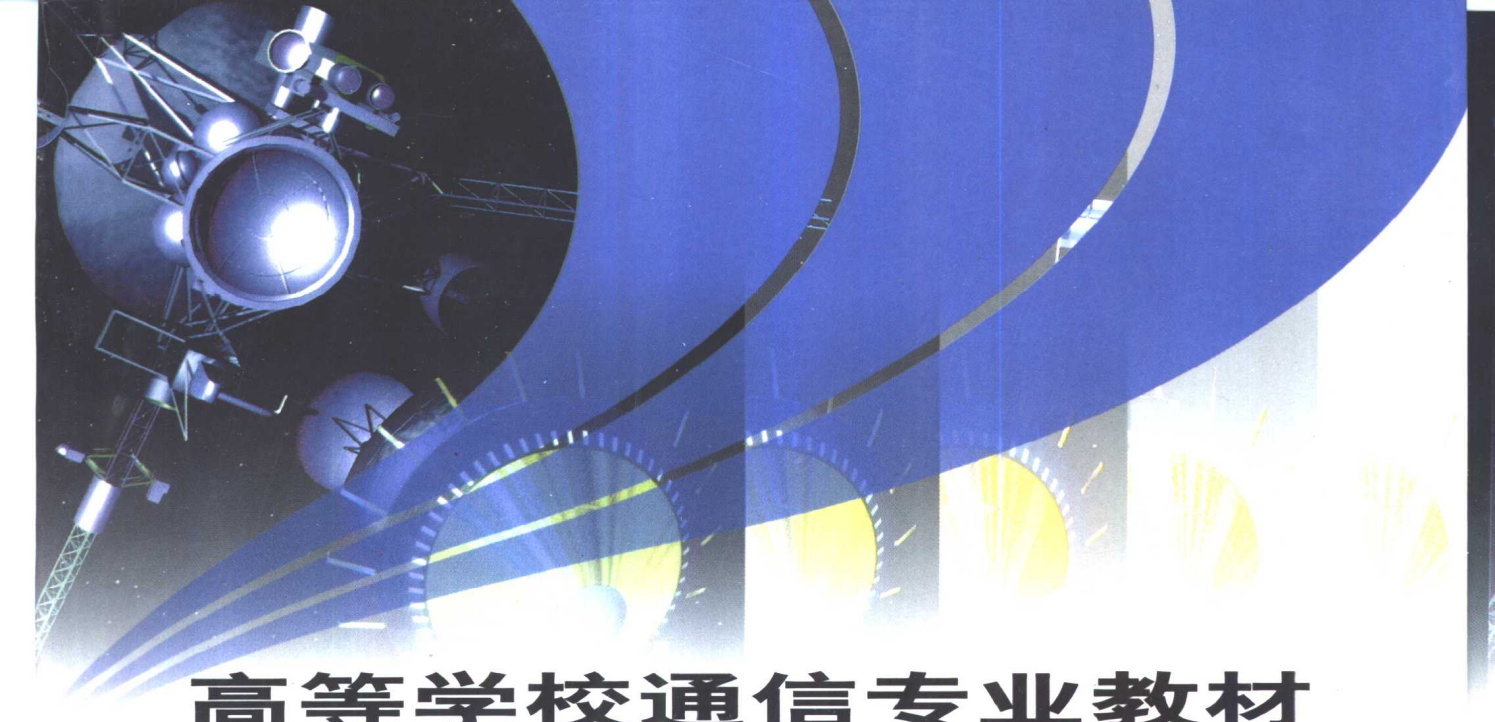




**高等学校通信专业教材**

# 现代通信原理

宋祖顺 等编著



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

高等学校通信专业教材

# 现代通信原理

宋祖顺 等编著

电子工业出版社  
Publishing House of Electronics Industry  
北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书主要讲述了现代通信系统的组成、各部件的工作原理及性能分析方法等。讲述方法是从物理概念入手,结合数学分析,阐明基本概念及原理的实质,力求深入浅出,通俗易懂。

本书可作为通信及相关专业通信原理课程的教材,也可作为工科院校及工程技术人员学习通信基础理论的参考书。

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,翻版必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代通信原理/宋祖顺等编著. - 北京:电子工业出版社,2001.2  
高等学校通信专业教材  
ISBN 7-5053-6255-0

I. 现... II. 宋... III. 通信理论-高等学校-教材 IV. TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 03863 号

丛 书 名:高等学校通信专业教材

书 名:现代通信原理

编 著 者:宋祖顺等

责任编辑:段 颖

特约编辑:伍 月

排版制作:电子工业出版社计算机排版室监制

印 刷 者:李史山胶印厂

装 订 者:

出版发行:电子工业出版社 URL:<http://www.phei.com.cn>

北京海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:22.25 字数:368千字

版 次:2001 年 2 月第 1 版 2001 年 6 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-5053-6255-0  
TN·1394

印 数:6 000 册 定价:28.80 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、所附磁盘或光盘有问题者,请向购买书店调换;  
若书店售缺,请与本社发行部联系调换。电话 68279077

## 序

为培养适应信息时代需要的高素质人才,近年来,全军通信院校实施了面向 21 世纪教学改革计划,在教学内容和课程体系改革上取得了丰硕成果。为及时总结和推广改革成果,从 1999 年开始,我部启动了“撰名著”工程,力求编写出一批思想性、先进性、针对性、实践性较强的“精品”教材,为培养高素质人才创造条件。

列入首批“撰名著”工程建设的教材共有 21 本,其中《数字电路与逻辑设计》、《通信电子线路》、《电磁场与电磁波》、《现代通信原理》、《现代通信技术》、《现代通信系统》等 6 本为统编教材。为确保质量,通信部集中了通信系统的院士、博士生导师和部分优秀中青年教学骨干,在统编教材的过程中,对编写纲目进行了集体审定。与以往出版的同类教材相比,这套教材具有以下特点:

**体现了时代性:**充分吸收新理论、新技术、新装备成果,整个知识点建立在“高”、“新”平台上,反映了本学科的发展前沿和趋势。

**突出了系统性:**6 本统编教材自成系列,对现代通信技术基础、原理、技术和运用等做了全面、系统的介绍,各教材内容衔接比较紧密,分工比较合理,层次分明,重点突出。

**加强了实践性:**在阐述理论知识的同时,注重基本技能和基本方法的讲授,并紧密结合通信建设实际,培养学员解决实际问题的能力。

**注重了通俗性:**概念、原理以及新技术的阐述比较精炼,深入浅出,图文并茂,便于自学。

我们希望这套教材的出版,能够有助于现代通信技术的传播,为现代通信事业的发展做出应有的贡献。

本套教材可作为高等院校通信及相关专业本、专科生课程教材,也可作为通信工程技术人员学习的参考书。

衷心地感谢为这套教材编写付出辛勤劳动的全体作者,感谢为此提供支持的院校、部队、机关领导和有关人员,感谢电子工业出版社为本套教材的出版所付出的努力。

总参谋部通信部

2000 年 12 月

# 前 言

人类社会经历了漫长的发展过程,由农业社会、工业社会正逐步迈入信息社会。物质、能源和信息构成了人类社会的三大基本资源。物质的生产和能源的开发导致了前几次产业革命。而信息的利用正引导着社会进入信息经济时代。信息作为一种资源,只有广泛地传播与交流,并为众多的人知道才能产生利用价值,创造出巨大的社会 and 经济效益。信息的广泛传播与交流,是依靠各种通信方式和传媒手段来实现的。信息社会任何信息流的阻塞都会给社会造成严重的危害。因此,信息社会对通信提出了越来越高的要求,一个覆盖全社会、高度智能化的信息网络,即一个现代全球通信系统是信息社会最重要的基础设施。学习与掌握现代通信原理是信息社会全体成员,特别是通信工作者的迫切要求。为了适应这一要求,我们编写了本书。本书以信息传输为核心,着重介绍了数字通信的基本原理,并围绕原理介绍最新的通信技术与实现方法。全书共分 11 章。

第 1 章 绪论 对通信系统组成和各部件的功能及信息基本概念做总体介绍,建立通信系统概念,为后面的学习打下基础。

第 2 章 随机信号分析 主要介绍随机变量及其统计特性、随机过程及统计特性、通信系统的噪声。重点分析了窄带高斯噪声及正弦波加窄带高斯噪声的振幅和相位分布,为分析数字通信系统抗噪声性能打下基础。

第 3 章 模拟调制 重点介绍线性调制和角度调制,分析各种调制的波形、时间函数、频谱、带宽、矢量图,对其抗噪声性能也进行了简略分析比较。

第 4 章 模拟信号数字化 取样定理是模拟信号数字化和时分多路复用的理论基础,在讲述取样定理后着重介绍 PCM 和  $\Delta M$  编、译码原理,并介绍目前常用的 ADPCM 编码原理。

第 5 章 数字基带传输系统 介绍基带信号传输的方框原理,基带信号的码型、波形、时间表示式及功率谱,码间串扰的概念及无码间串扰传输的条件,分析基带系统的误码特性,并介绍部分响应技术和眼图。

第 6 章 数字调制 介绍基带的二进制数字调制、各种多进制调制及多种现代调制技术。

第 7 章 数字信号的最佳接收 介绍最大信噪比接收、最小均方误差接收、最小错误概率接收、最大后验概率接收的概念及数学模型,分析最佳接收的性能,并与实际接收机做比较,最后介绍基带系统的最佳化。

第 8 章 同步技术 介绍载波同步、位同步、群同步的原理、实现方法及性能分析。

第 9 章 信道编码 介绍差错控制工作方式及差错控制的基本概念,以及线性分组码、汉明码、循环码、卷积码、 $m$  序列和 Turbo 码。

第 10 章 均衡技术 介绍时域均衡器的原理及抽头系数的确定,迫零算法、最小均方畸变算法等自适应均衡器原理及实现方法。

第 11 章 数字通信系统举例 以 TCT-301 短波高速调制解调器为例介绍数字通信设备的组成和整机工作原理,使理论联系实际,建立完整的数字通信系统的概念。

为使读者能较好地理解基本概念和掌握通信系统的分析方法,每章均精选了一些例题和习题,以供学习时参考。

陈太一院士对本书的编写工作给予了极大的关心与支持,从编写的指导思想、内容选取到编写方法给出了很多具体的指导,使我们受益匪浅。王金龙副院长多次召集会议确定编写提纲和章节内容,提供资料,对编写给予许多关心。本书第9章9.9节、第10章、第11章由陈瑾执笔,第4章增量调制( $\Delta M$ )系统由沈其聪执笔,第5章5.8节、第7章、第9章由宋晓勤执笔,其他章节由宋祖顺执笔。全书由宋祖顺统稿。初稿完成后,东南大学无线电系沈连丰教授、解放军理工大学通信工程学院沈振元教授在百忙之中仔细审阅了全部书稿,提出了许多宝贵意见,编者在修改定稿时采纳了这些建议,使本书的内容更为完整和充实。通信工程学院的沈越泓、张仁平、黄葆华、高媛媛和傅常庚、叶芝慧、张伟明、侯兴康、沈忠良等老师,他们在教学中多次使用过本书的初稿,对编写工作给予了热情支持。通信工程学院教保科的许晔峰和其他工作人员在本书的印刷出版、打印、校对等方面做了许多工作,我们深表谢意!电子工业出版社段颖编辑为本书的出版付出了辛勤的劳动,在此一并表示衷心感谢!

与本书配套,我们还编写了实验指导书和习题解,将另行出版。

限于编者水平,书中难免存在错误和不足之处,恳请广大读者不吝指正。

编著者

2000年9月

# 目 录

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| 第 1 章 绪 论 .....                | ( 1 ) |
| 1.1 通信系统的基本模型 .....            | ( 1 ) |
| 1.2 通信系统的分类和数字通信系统 .....       | ( 2 ) |
| 1.3 信息量与香农公式 .....             | ( 5 ) |
| 1.4 数字通信系统的主要性能指标 .....        | ( 7 ) |
| 习 题 .....                      | ( 8 ) |
| 第 2 章 随机信号分析 .....             | ( 9 ) |
| 2.1 概率论基础知识 .....              | ( 9 ) |
| 2.2 随机变量与概率分布 .....            | (12)  |
| 2.3 随机变量的函数 .....              | (24)  |
| 2.4 随机过程 .....                 | (25)  |
| 2.5 通信系统中的噪声 .....             | (34)  |
| 2.6 窄带高斯噪声的振幅特性和相位特性 .....     | (37)  |
| 2.7 正弦波加窄带高斯噪声的统计特性 .....      | (41)  |
| 2.8 小结 .....                   | (44)  |
| 习 题 .....                      | (44)  |
| 第 3 章 模拟调制 .....               | (48)  |
| 3.1 幅度调制 .....                 | (48)  |
| 3.2 频分复用(FDM) .....            | (73)  |
| 3.3 非线性调制(角度调制) .....          | (74)  |
| 3.4 小结 .....                   | (93)  |
| 习 题 .....                      | (93)  |
| 第 4 章 模拟信号数字化 .....            | (95)  |
| 4.1 抽样定理 .....                 | (95)  |
| 4.2 脉冲编码调制(PCM)系统 .....        | (106) |
| 4.3 增量调制( $\Delta M$ )系统 ..... | (138) |
| 4.4 小结 .....                   | (152) |
| 习 题 .....                      | (152) |
| 第 5 章 数字基带传输系统 .....           | (154) |
| 5.1 数字基带传输系统的方框原理 .....        | (154) |
| 5.2 数字基带信号 .....               | (155) |
| 5.3 基带波形的形成 .....              | (163) |
| 5.4 码间串扰 .....                 | (164) |
| 5.5 数字基带系统的理想传输特性 .....        | (166) |
| 5.6 无码间串扰时噪声对传输性能的影响 .....     | (171) |

|              |                                |              |
|--------------|--------------------------------|--------------|
| 5.7          | 眼图 .....                       | (173)        |
| 5.8          | 部分响应技术 .....                   | (174)        |
| 5.9          | 小结 .....                       | (181)        |
|              | 习 题 .....                      | (181)        |
| <b>第 6 章</b> | <b>数字调制 .....</b>              | <b>(184)</b> |
| 6.1          | 引言 .....                       | (184)        |
| 6.2          | 振幅键控(ASK) .....                | (185)        |
| 6.3          | 频率键控(FSK) .....                | (194)        |
| 6.4          | 相位键控(PSK) .....                | (202)        |
| 6.5          | ASK、FSK、PSK 性能比较 .....         | (210)        |
| 6.6          | 多进制数字调制 .....                  | (211)        |
| 6.7          | 其他形式的数字调制 .....                | (220)        |
| 6.8          | 相对四相相移键控( $\pi/4$ DQPSK) ..... | (225)        |
| 6.9          | 小结 .....                       | (231)        |
|              | 习 题 .....                      | (231)        |
| <b>第 7 章</b> | <b>数字信号的最佳接收 .....</b>         | <b>(233)</b> |
| 7.1          | 最大输出信噪比接收 .....                | (233)        |
| 7.2          | 最小均方误差接收 .....                 | (241)        |
| 7.3          | 最小错误概率接收 .....                 | (242)        |
| 7.4          | 最大后验概率接收 .....                 | (245)        |
| 7.5          | 最佳接收机性能分析 .....                | (246)        |
| 7.6          | 基带系统最佳化 .....                  | (251)        |
| 7.7          | 各类系统最佳接收机与实际接收机比较 .....        | (252)        |
| 7.8          | 小结 .....                       | (253)        |
|              | 习 题 .....                      | (253)        |
| <b>第 8 章</b> | <b>同步技术 .....</b>              | <b>(256)</b> |
| 8.1          | 概述 .....                       | (256)        |
| 8.2          | 载波同步 .....                     | (257)        |
| 8.3          | 载波同步系统的性能 .....                | (268)        |
| 8.4          | 位同步 .....                      | (272)        |
| 8.5          | 位同步系统的性能 .....                 | (279)        |
| 8.6          | 群同步 .....                      | (281)        |
| 8.7          | 群同步系统的性能 .....                 | (287)        |
| 8.8          | 群同步的保护 .....                   | (290)        |
| 8.9          | 小结 .....                       | (292)        |
|              | 习 题 .....                      | (292)        |
| <b>第 9 章</b> | <b>信道编码 .....</b>              | <b>(294)</b> |
| 9.1          | 概述 .....                       | (294)        |
| 9.2          | 差错控制编码的基本概念 .....              | (296)        |
| 9.3          | 线性分组码 .....                    | (301)        |



|                                                                                                              |       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 9.4 汉明码 .....                                                                                                | (305) |
| 9.5 循环码 .....                                                                                                | (306) |
| 9.6 卷积码 .....                                                                                                | (311) |
| 9.7 $m$ 序列 .....                                                                                             | (315) |
| 9.8 网格编码调制 .....                                                                                             | (319) |
| 9.9 Turbo 码 .....                                                                                            | (321) |
| 9.10 小结 .....                                                                                                | (323) |
| 习 题 .....                                                                                                    | (323) |
| <b>第 10 章 均衡技术</b> .....                                                                                     | (325) |
| 10.1 时域均衡的原理 .....                                                                                           | (325) |
| 10.2 抽头系数的确定 .....                                                                                           | (327) |
| 10.3 均衡算法及实现 .....                                                                                           | (328) |
| 10.4 小结 .....                                                                                                | (331) |
| 习 题 .....                                                                                                    | (331) |
| <b>第 11 章 数字通信系统举例</b> .....                                                                                 | (333) |
| 11.1 概述 .....                                                                                                | (333) |
| 11.2 TCT-301 短波高速调制解调器的基本原理 .....                                                                            | (334) |
| 11.3 TCT-301 短波高速调制解调器的主要性能指标 .....                                                                          | (335) |
| 11.4 关键技术 .....                                                                                              | (336) |
| 11.5 软硬件设计及框图 .....                                                                                          | (342) |
| 11.6 小结 .....                                                                                                | (343) |
| <b>附录 A <math>\operatorname{erf} x</math>、<math>\operatorname{erfc} x</math> 与 <math>x</math> 的数值表</b> ..... | (344) |
| A.1 误差函数表 .....                                                                                              | (344) |
| <b>附录 B</b> .....                                                                                            | (345) |
| B.1 贝塞尔函数表 .....                                                                                             | (345) |
| B.2 贝塞尔函数曲线 .....                                                                                            | (345) |
| <b>参考文献</b> .....                                                                                            | (346) |

# 第 1 章 绪 论

通信是一门古老而又年青的学科。说它古老,是因为自从人类组成社会以来就有通信;说它年青,是因为它至今仍在蓬勃发展,而且展现出无限的前景。

从一般意义上说,互通情报、交换消息就称为通信。通信学科就是研究如何有效、可靠地把消息从一地传递到另一地的一门科学。

## 1.1 通信系统的基本模型

通信是把消息从一地传送到另一地。譬如说从甲地传送消息到乙地,那么甲地称为发信端,乙地称为接收端。以最简单的通信方式——面对面交谈为例,讲话是表达消息的一种方式。发话人是消息的来源,称为信源;话音通过空气传到对方,而传递消息的媒质称为信道;听话者听到后获得消息,是消息的归宿,称为信宿。这样就完成了消息的传递,也就构成了通信系统,这个过程可以用图 1.1 表示。

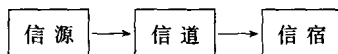


图 1.1 通信系统简图

对电通信而言,诸如语音、报文、图像等一类原始消息首先要转变成电量,因此在发信端要加入输入变换器;为使变换器产生的电量能适合信道传送的要求,在发信端还必须要有发送设备。在接收端要完成相反的过程,因此接收设备和输出变换器是必不可少的。由于发送、接收设备和信道不可避免地要引入噪声,通常把所有可能产生的噪声归结到信道中,图 1.2 所示便是通信系统的基本模型。

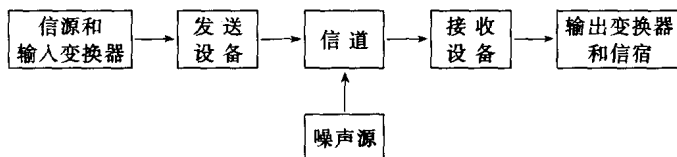


图 1.2 通信系统基本模型

实际通信系统形式虽然很多,但总包括这五个部分,下面对每个方框进行说明:

**信源和输入变换器** 信源是消息的来源,通常消息是非电的,因此必须把来自信源的消息转变成随时间变化的电量,这个电量称为消息信号或基带信号。这个过程是由输入变换器完成的,如语音激励的送话器、电视摄像机、光电输入机等就属这类输入变换器。

**发送设备** 把输入信号联接到信道上。虽然有时发信机的输入信号直接加到信道上是可行的,但为了加工信号,使信号满足信道传送的各项要求,发送设备常常是必要的。由发送设备完成的信号加工工作主要包括放大、滤波和调制。在这些加工中最重要的是调制。通过调制,使被传送信号的特性与信道的要求相匹配。

**信道** 信号的通道。信源与信宿在物理上往往是分开的,信道提供了信源与信宿之间在电气上的联系。信道具有许多不同的形式,例如自由空间的短波无线电信道,双导线、电缆或光纤,卫星或微波接力等等,都是常见的实际信道。

**接收设备** 从来自信道的各种微弱传输信号和噪声中选择所需要的消息信号。接收机主要是通过解调过程来完成这个功能,而解调是发信设备调制过程的逆过程。由于存在噪声和有用信号的畸变,接收机不一定能完全再现消息信号。接收设备研究的重要课题就是采用什么样的解调方式才能有效地克服和减小噪声和其他信号的影响。接收设备除了完成解调任务之外,还将为信号提供放大和滤波。

**输出变换器和信宿** 信宿是信息的归宿,也就是消息的接收者。比如传送的是语言消息,接收者是用耳朵听,人耳接收的是声波的振动,因此还需要把接收设备复制的电信号转换成接收者能接受的消息,如语音振动。这种设备就是输出变换器。输出变换器有许多种,如耳机、扬声器、电视屏幕、凿孔机、磁带记录仪、打印机等等,都是典型的输出变换器。

**噪声源** 它与上述部件不同,它不是人们有意加入的设备,而是通信系统中各种设备以及信道中固有的,并且是人们不希望有的。在通信系统中,某些点的噪声与信号相比可以忽略(如发信机中),所以不考虑噪声的影响。然而在有些点,噪声与信号功率相当,甚至噪声超过信号,这样噪声将严重地降低通信系统的性能,通信系统设计的主要任务就是同噪声做斗争。通信系统中的噪声从来源分,包括系统中各部件自身产生的内部噪声和外部噪声源对系统的作用而引起的外部噪声。由于信道对传输信号有衰减,在信道输出端信号常常是最小的,同时外部噪声往往是从信道引入,加之内部噪声,在这里噪声的影响最为严重,因此把噪声抽象为从信道加入,对分析通信系统性能是合适的,而且这样处理噪声为分析问题带来了方便。

## 1.2 通信系统的分类和数字通信系统

前面已经说过,随着通信技术的发展,通信的内容和形式不断丰富。因此通信的种类层出不穷,很难列举齐全。按照不同的分类法,通信就有不同的种类,常见的分类法有:

按收发两地有没有一条具体的线路相连接来区分,通信分为有线通信和无线通信。常见的以架空明线、电缆、波导管和光缆等作为线路连接的均属有线通信,而中、长、短波通信、微波接力通信、卫星通信、散射通信等均属无线通信。

按消息的形式分,如传送的消息是语音则称为电话,传送的消息是文字、符号则为电报,传送的是固定图像为传真,传送的是活动图像为电视。

按信号性质分,传送模拟信号的通信为模拟通信,传送数字信号的通信为数字通信。

前两种分类法是大家都很熟悉的,为搞清第三种分类法,我们有必要对模拟信号与数字信号加以介绍。

凡信号的某一参量可以取无限多个值,并且直接与消息对应的信号称为模拟信号。语音激励话筒而产生的信号波形如图 1.3 所示。语音信号不但在时间上连续,而且它的幅度有无穷多个取值,并且其值的大小与语声强弱一一对应,显然它是模拟信号。

凡信号的某一参量只能取有限个值,并且常常不直接或者不准确地与消息对应的信号称为数字信号。莫尔斯电报信号如图 1.4 所示。该信号的幅度只能取 0 V 和 A V 两个值,它是靠取值变化的排列表示消息,因此它只能间接地与消息发生联系,它是数字信号。

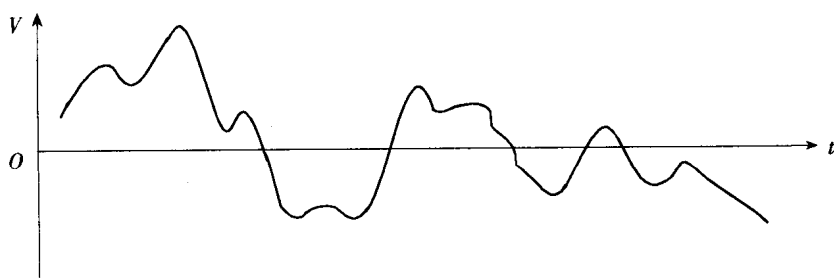


图 1.3 语音信号波形

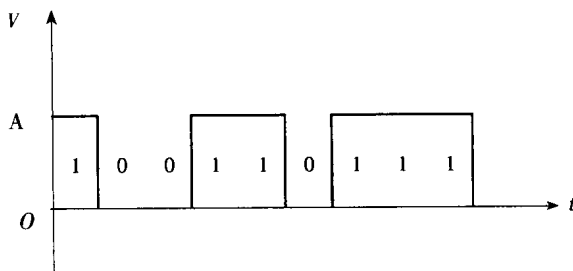


图 1.4 莫尔斯电报信号

图 1.5(a)所示是电视摄像机输出的亮度信号,它在时间上虽然与莫尔斯电报信号相似,是离散的,但亮度信号的幅度可以取无穷多种数值,其值大小与被摄物体亮度一一对应,因此它是模拟信号。图 1.5(b)所示是二相调相信号,从时间上看它虽然是连续变化的信号,但因为这种信号的相位只有两个取值(例如不是零相就是  $\pi$  相),因此它是数字信号。由此可见模拟信号与数字信号区别的关键是表示信息的信号参量的取值数量。取值为无限,必然能与消息一一对应,则为模拟信号;取值有限,只能间接地或不准确地与消息对应,则为数字信号。

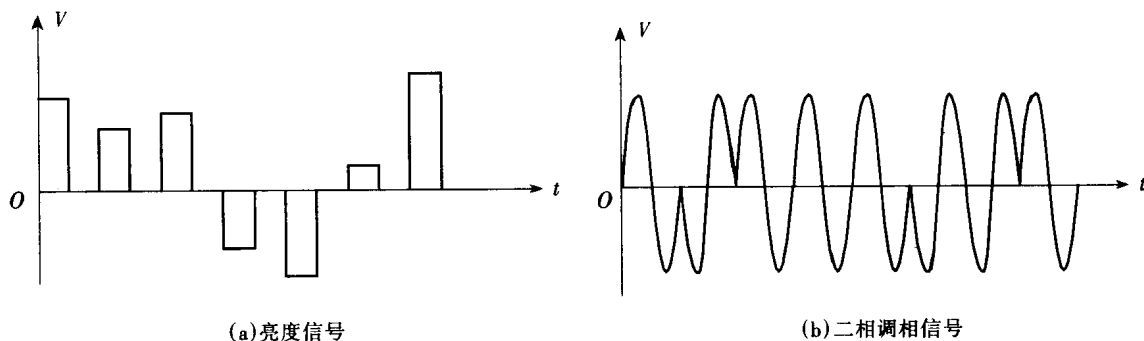


图 1.5

以上说明了模拟信号及数字信号,我们把模拟信号作为载体传送消息的通信系统称为模拟通信系统,把数字信号作为载体传送消息的通信系统称为数字通信系统。

数字通信系统方框原理如图 1.6 所示,把它与图 1.2 比较,可以发现两者基本形式一致,图 1.6 将图 1.2 中发送设备和接收设备两个方框更具体化。发送设备包含信源编码、信道编码和数字调制;接收设备包含数字解调、信道译码和信源译码。前者的任务是把信源输出的消息变换成便于在信道上传送的信号,后者完成相反的过程,即把信道输出的信号变换成接收者需要的消息。这里采用了两个串接的编码方框和译码方框,其目的是把依赖于信源特性和接收者要求的编译码与依赖于信道特性的编译码区别开来,因为这两种编译码的目的、作用、实现方法及考虑问题的出发点是完全不同的。经过编码得到的数字序列,通常称为基带信号。

它可以直接在市话电缆等有线信道中传输,我们称这类系统为数字基带系统。但是对于大多数的无线及微波信道、卫星信道、光缆及高频电缆信道等,它们共同的特点是具有带通信道特性,为了使基带信号与带通型信道匹配,则数字调制与解调是必需的,这样的系统也称为数字调制系统。考虑到信道编码、译码的目的是为了纠正数字信号传输中的错误,我们把信道编译码、调制与解调以及信道这些部件合起来称为数字传输系统,如图 1.6 所示。由于数字通信系统种类很多,图 1.6 中的方框也不是一成不变的。如前所述,若是数字基带系统,则数字调制与解调两个方框是没有的;若是保密通信系统,则发信端信源编码器后要插入加密器,相应接收端在信道译码后要插入解密器;又如信源若是计算机输出的数据,信宿也是计算机,则信源编译码也可以不要,因为它的功能由计算机完成了。可见图 1.6 中的方框可视具体情况而增减。另外,对数字通信系统,信息的传输与接收是一个接一个按节拍发送与接收,收发步调必须一致,这是由同步系统来保证的。由于同步的种类与实现方法各不相同,它可能与上述方框中的一个方框或若干个方框有关,无法在方框图中具体表示,因此图 1.6 中没有画出同步系统,但同步往往是数字通信系统中不可缺少的重要部件。

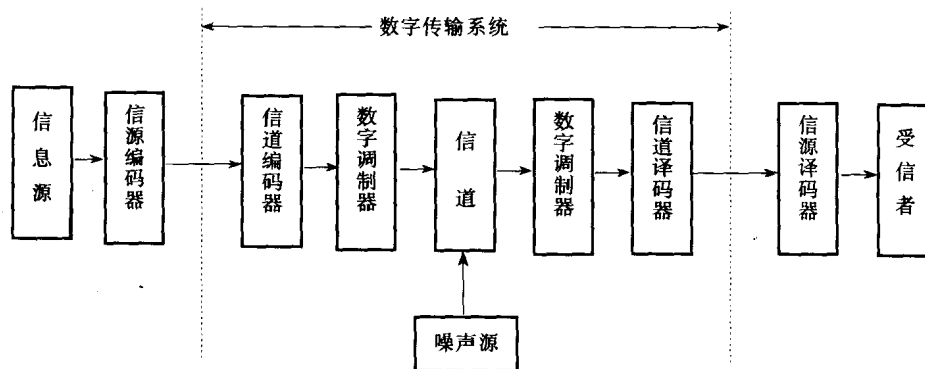


图 1.6 数字通信系统方框原理图

应当指出,并非模拟信号一定要在模拟通信系统中才能传输,如有必要模拟信号也可在数字通信系统中传输,不过此时应先把模拟信号变换成数字信号,即模/数变换,经数字通信系统传输后,在接收端再进行相反的变换,即数/模变换,以还原为原模拟信号。数字电话系统就是以数字方式传输语音模拟信号的例子。同样数字信号也并非一定要在数字通信系统中才能传输,只要对模拟通信系统或数字通信设备加以适当的改造,数字信号也可在大量现有的模拟通信系统中传输。目前各种 MODEM 就是因为数字信号能在模拟通信系统中传输而得到广泛应用。由此可见,模拟通信与数字通信的区别,关键是由信道上传送信息的信号性质决定,若信道上传送的是模拟信号,则为模拟通信,信道上传送的是数字信号,则为数字通信。

尽管低级的电报通信可视为数字通信,它出现的时间最早,但自从电话发明以后,模拟通信获得了极大的发展,长期以来模拟通信占据了通信的统治地位。但是在 20 世纪 60 年代以后,数字通信日益兴旺起来,随着电子计算机和各种数据处理机的广泛应用及电子计算机网络的逐步形成,数据传输量急剧增加,对数字通信提出了更高更迫切的要求。与模拟通信相比,数字通信有如下优点:

(1) 数字传输的抗噪声(或抗干扰)的能力强,尤其在中继时,数字信号还可以再生而消除噪声的积累。

(2) 传输中的差错可以设法控制,不但可以发现而且还能改正,因而大大提高了传输质量。

(3) 便于同计算机联接,采用现代计算机技术对数字信息进行处理,以便实现通信现代化、自动化。

(4) 数字信息易于加密且保密性强。

(5) 由于数字集成电路,特别是大、中规模集成电路技术日益成熟,数字通信设备越来越易于制造,成本低、体积小、可靠性高。

(6) 与模拟通信相比数字通信可以传输种类更多的消息,使通信系统变得通用、灵活。

但是数字通信也有它的不足之处,这就是目前它比模拟通信占据更宽的频带。比如一路模拟电话通常只占据 4 kHz 带宽,但一路数字电话可能要占据几十千赫带宽,可以认为数字通信的许多优点是以信号频带为代价而换取的。本书的重点放在数字通信,但考虑到目前还大量存在的模拟通信系统,因此对模拟通信的内容也会适当兼顾。

## 1.3 信息量与香农公式

本课程的学习中经常会遇到消息、信号、信息等概念,从字面解释,消息是指人或事物情况的报道;信号则是消息的载体,也就是消息的携带者。通信就是利用电流、电压、无线电波、光波等信号作为载体携带消息,实现消息的传递;信息是指对于接收者来说事先不知道的消息。因此消息与信息是不同的,信息与不确定性紧密相关。在有效的通信中,信源将要发送的信号是不确定的,接收者在接收到信号后不确定性减小或消失,那么接收者从不知到知,从而获得信息。信息是有量值的,信息量的定义如下:

假设信源是由  $q$  个离散符号  $S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_q$  所组成的符号集合,集合中的每个符号是独立的,其中任一符号  $S_i$  对应出现的概率为  $P(S_i)$ ,并且  $0 \leq P(S_i) \leq 1, \sum P(S_i) = 1$ 。那么符号  $S_i$  含有的信息量记为  $I(S_i)$ ,则

$$I(S_i) = \log_2 \frac{1}{P(S_i)} = -\log_2 P(S_i) \quad (1.1)$$

上述的对数底为 2,则信息量  $I(S_i)$  的单位为比特(bit)。

首先研究最简单的情况,即二元制等概信源。此时信源符号仅有“0”和“1”,并且对应的概率均为  $\frac{1}{2}$ ,根据信息量的定义,有

$$I(S_0) = I(S_1) = -\log_2 \frac{1}{2} = 1(\text{bit})$$

这就是说等概二元制信源每一个符号的信息量为 1bit。它正好是信息量的单位。为什么把二进制一个符号所携带的信息量作为信息量的单位?这是因为对于二进制信源,在接收者没有收到符号前就知道它只有两种可能,未知的或不肯定的仅是两种符号中到底哪一个被发送,只有当接收到符号后这种不肯定性才消除,所以获得了信息。这是最简单的信息,因为若比二元制再简单,就是一元制,一元制仅有一种状态,状态惟一,不包含信息,那就不用发送了。因此将等概二元制一个符号所含信息作为信息量的单位是合理的。

其次,信息量的定义把信息的度量与信源符号出现的概率紧密联系在一起。这就把信息的测度纳入概率的范畴,概率越小,信息量越大。这也符合人们对信息量的理解。

第三,信息量用对数表示能准确表达信息量的物理本质:

(1) 确定符号,概率为 1,取对数为 0,正好表示确定符号信息量为零。

(2) 对数能正确表示传递多个符号总的信息量为各符号信息量之和。

例如 3 个等概二元制符号总信息量为单个符号的 3 倍,即为 3 bit。因为 3 个二元制符号有 8 种排列,并且等概,其概率均为  $\frac{1}{8}$ ,所以  $I(3S) = -\log \frac{1}{8} = 3 \text{ bit}$ 。因为  $-\log \frac{1}{8} = -\log\left(\frac{1}{2}\right)^3 = 3(-\log \frac{1}{2}) = 3I(S)$ ,所以  $I(3S) = 3I(S)$ ,这就是说 3 个信息符号的信息总量是每个符号信息量之和,因此对数特性能准确的表示信息的可加性。

(3) 信息量最小为零,不会为负。

由于  $0 \leq P(S_i) \leq 1$ ,所以  $-\log P(S_i)$  最小为零,不可能为负,因此对数的这种特性也正好反映了信息量不会为负的特点。

一般来说,信源里各符号出现的概率并不相等,根据(1.1)式定义的各符号所含信息量各不相同。如果先后相继发出的符号互不相关,即统计独立,其信源符号平均信息量记为

$$H(S) = \sum_{i=1}^q P(S_i) I(S_i) = - \sum_{i=1}^q P(S_i) \log_2 P(S_i) \quad (1.2)$$

$H(S)$  称为该信源的熵。根据(1.2)式,熵有如下性质:

(1) 熵的物理概念是信源每个符号的平均信息量,单位是比特/符号。

(2) 熵是非负的,最小为零。

(3) 当信源符号等概时,熵有最大值,记为

$$H_{\max}(S) = \log_2 q$$

式中  $q$  为信源符号个数。

(4) 只要信源各符号不等概,则  $H(S) < H_{\max}(S)$ 。

$$\frac{H_{\max}(S) - H(S)}{H_{\max}(S)} = 1 - \frac{H(S)}{H_{\max}(S)} \quad (1.3)$$

(1.3)式称为信源冗余。只要信源各符号不等概,则信源冗余存在,由于冗余存在,信源编码就可压缩。改变信源原有的概率分布,使之逼近或达到等概分布,这就是信源压缩编码的最基本的方法之一。

信源发出的信息是以信号的形式通过信道进行传送的,单位时间通过信道的平均信息量称为信息速率,记为

$$R_b = \frac{H(S)}{T_B} (\text{bit/s})$$

式中  $T_B$  是每个符号持续的时间。

当信源的熵取最大值时,信息速率也达到最大,即

$$R_{b,\max} = \frac{H_{\max}(S)}{T_B} (\text{bit/s})$$

$R_{b,\max}$  也称为信道容量,它是信道最大无误信息速率。香农经过长期研究,在高斯噪声条件下,提出著名的香农公式

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N}\right) \quad (1.4)$$

式中  $B$  是信道带宽,  $S$  是信号功率,  $N$  是噪声功率。对高斯白噪声,  $N = n_0 B$ ,  $n_0$  为单边功率谱密度(以后会详细地讨论)。香农公式说明:

(1) 当信号功率和噪声功率给定,在一定带宽的信道上,理论上在 1 秒种内无差错传递的

最大信息量为  $C = B \log_2(1 + \frac{S}{N})$ , 如果要以比  $C$  更快的速率无误地传递消息是不可能的。目前在任一信道上传递信息, 实际速率都远低于  $C$ 。

(2) 从(1.4)式看出, 若要保持  $C$  不变, 当  $\frac{S}{N}$  减小时则需增加  $B$ ; 或  $B$  减小时, 则需提高  $\frac{S}{N}$ 。这就是说给定的信道容量, 可以用减小信噪比和增大信道带宽来达到, 也可以用增加信噪比和减小信号带宽来实现。因此在维持信道容量不变时, 带宽和信噪比可以互换。

(3) 香农公式仅仅给出了带宽和信噪比可以互换, 但它并没有指出具体的实现方法。如何实现带宽和信噪比的互换以及如何提高信息速率将是通信原理研究的重要课题。

## 1.4 数字通信系统的主要性能指标

人们对通信系统的要求是多方面的, 评价通信系统的优劣涉及到信息传输的有效性、可靠性、适应性、标准性、经济性, 甚至还包括设备的造型是否美观大方, 维修是否方便等等, 但是在名目繁多的要求中起着主导和决定作用的是有效性和可靠性。有效性是通信系统传输信息速度的表征, 而可靠性是通信系统传输信息质量上的要求。人们总是希望通信系统传输的信息既快又准确, 即既有效又可靠。然而有效性与可靠性两者却是矛盾的, 这对矛盾只能依据实际要求取得相对的统一。例如在满足一定可靠性的指标下, 尽量提高传输速度, 或者在维持一定有效性的前提下, 使消息传输的质量尽量提高。

数字通信系统中有效性是用传输速率和信息速率来衡量的。

传输速率又称传码率、波形速率、码元速率等。数字通信是用有限个数字波形来代表信息的, 那么每秒钟所传输的数字波形的数目(亦即码元数目)就是传输速率, 它通常用符号  $R_B$  表示, 它的单位是波特, 记为 B。例如某数字通信系统, 每秒钟传送 4 800 个数字波形(或者说 4 800 个码元), 则传输速率为 4 800 波特(或记为 4 800 B)。

仅用传输速率来表示有效性是不够的, 因为传输速率仅仅表征了单位时间内传送数字波形的个数, 而没有限定这种波形是何种进制, 因为不同进制的波形含有的信息量是不相同的。波形速率相同, 多进制波形所传送的信息量比二进制要大, 显然两者的有效性各不相同。举例来说, 若要进行天气预报, 有八种天气状况——晴、云、阴、雨、雪、雾、霜、雹需要传送, 如每秒钟报一次, 采用八进制, 八种码元与八种天气一一对应, 则传输速率为 1 B 就能完成任务。若用二进制码元传送, 八种天气按如下关系与二进制码对应: 晴、云、阴、雨、雪、雾、霜、雹, 因此必须要用三个二进制码元的不  
000 001 010 011 100 101 110 111  
同排列才能区别表示八种天气, 若每秒钟报告一次天气, 则传输速率为 3 B 才能实现。这两种方式, 就它们完成任务的情况来说是相同的, 都是完成八种天气情况的预报, 且每秒传送一次, 也就是传送的信息是相同的, 然而它们所需的传输速率(码元速率)却不相同, 八进制为 1, 二进制为 3。从传输信息而言, 八进制每 1 个码元起到 3 个二进制码元的作用, 即以 1 顶 3。因此传输速率还不能完全表示出通信系统的有效性, 为弥补上述的不足, 可采用前一节介绍的信息速率  $R_b$ (又称传信率)。

对等概二元制系统, 1 个码元的平均信息量为 1 bit, 则  $R_{b2} = R_{B2}$ , 需要提醒读者注意的是, 说它们相等仅仅是数值相等, 两者的单位却是不相同的,  $R_b$  的单位为 bit/s, 而  $R_B$  的单位为 B。

对多进制系统,  $R_{bN} = (\log_2 N) R_{BN}$ , 这里也是指数值之间的关系, 两者的单位各不相同。



若  $N$  进制的数字通信系统,每秒钟传送  $N$  进制的码元为  $R_{BN}$ ,折算到二进制,或说保持信息速率不变改用二进制传送,则二进制的传输速率为

$$R_{B2} = R_{BN} \log_2 N \text{ (B)} \quad (1.5)$$

数字通信的可靠性是以误码率、误信率、误字率、误句率等来衡量的。

误码率记为  $P_e$ ,它定义为

$$P_e = \frac{\text{错误接收的码元数}}{\text{传输的总码元数}}$$

误信率又称误比特率,记为

$$P_b = \frac{\text{错误接收的比特数}}{\text{传输的总比特数}}$$

二进制 1 个码元就是 1 个比特,所以  $P_{e2} = P_{b2}$ 。

误字率记为

$$P_L = \frac{\text{错误接收的字数}}{\text{传输的总字数}}$$

误码率与误字率之间是相互联系的,但它们又有区别,一般说误码率大,误字率也大,但两者并不相等。误字率不仅决定于误码率的大小,同时还与误码的图样,即误码出现的位置有关。举例来说,用 16 个二进制码元组成一个汉字时,如传送 16 个汉字,共传送  $16 \times 16 = 256$  个码元。当误码率为  $\frac{1}{16}$  时,误字率不一定为  $\frac{1}{16}$ 。在此例中,若误码每隔 15 个码元出现一个,则 16 个汉字全错,误字率为 1。若 16 个误码是连续出现的,并且集中在一个汉字上,则误字率才为  $\frac{1}{16}$ 。由此可见,通常误字率大于误码率。当误码位置随机出现,已知误码率并运用概率论知识,可以求出对应的汉字误字率

$$P_L = 1 - (1 - P_e)^{16}$$

## 习 题

1. 某八进制数字通信系统,传输速率为 1 200 B,它的传信率为多少?若保持信息速率不变,改用二进制系统传输,二进制系统的传输速率为多少?

2. 某二进制传输系统,传输速率为 2 400 B,求信息速率;若保持传输速率不变,用四进制传送信息,再求信息速率。

3. 设计一个能传送 5 000 汉字的数传机,要求每秒钟传送 50 个汉字(通常每个汉字采用 16 位二进制码表示),求  $N=8$ 、 $N=4$  时的传输速率和信息速率。

4. 在二元制中,若平均传 50 个汉字错一个码元,求误码率和误字率。

5. 如果已知发送独立的符号“E”和“Z”的概率分别为 0.107 3 和 0.000 63;又知中文电报中,数字“0”和“8”的概率分别为 0.155 和 0.06。求它们的信息量。

6. 设有 A、B、C、D 四个消息分别以概率  $\frac{1}{4}$ 、 $\frac{1}{8}$ 、 $\frac{1}{8}$ 、 $\frac{1}{2}$  传送,假设它们的出现相互独立,试求消息熵。

7. 黑白电视机的图像每秒传输 25 帧,每帧有 625 行;屏幕的宽度与高度之比为 4:3。设图像的每个像素的亮度有 10 个电平,各像素的亮度相互独立,且等概出现,求电视图像给观众的平均信息速率。