

21 世纪高等学校计算机学科系列教材

# 通 信 原 理

孙学军 王秉钧 编著

**Publishing House of Electronics Industry**

北京 · BEIJING

## 内 容 简 介

本书较全面、系统地讲述通信系统的基本原理、基本性能和基本分析方法,其内容以数字数据传输为主。全书共分9章,内容包括:绪论、信号和噪声、模拟调制系统、基带数字信号及其传输、数字调制系统、通信系统的噪声性能、多路复用和多址技术、通信网、同步原理等。各章均有习题,并附有部分习题答案。

本书除必要的数学推导外,注意讲述物理概念和直观的图形分析。叙述深入浅出,通俗易懂,重点突出,便于自学。

本书可作为高等学校计算机、通信工程和其他相近专业本科生教材,也可供从事这方面工作的广大科技人员阅读和参考。

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,翻版必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

通信原理/孙学军编著. —北京:电子工业出版社,2001.9

面向21世纪计算机专业教材

ISBN 7-5053-6707-2

I. 通… II. 孙… III. 通信理论—教材 IV. TN911

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第061035号

丛 书 名:21世纪高等学校计算机学科系列教材

书 名:通信原理

编 著 者:孙学军 王秉钧

责任编辑:张荣琴

特约编辑:孙 俊

排版制作:电子工业出版社计算机排版室

印 刷 者:北京东光印刷厂

装 订 者:三河市万和装订厂

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

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:15.25 字数:400千字

版 次:2001年9月第1版 2001年9月第1次印刷

书 号: ISBN 7-5053-6707-2  
TP·3746

印 数:5 000册 定价:20.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页、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 言

这套教材是面向 21 世纪计算机学科系列教材。为什么要组织这套教材？根据什么编写这套教材？这些都是在这篇序言中要回答的问题。

计算机学科是一个飞速发展的学科,尤其是近十年来,计算机向高度集成化、网络化和多媒体化发展的速度一日千里。但是,从另一个方面来看,目前高等学校的计算机教育,特别是教材建设,远远落后于现实的需要。现在的教材主要是根据《教学计划 1993》的要求组织编写的。这个教学计划,在制订过程中主要参照了美国 IEEE 和 ACM 的《教学计划 1991》。

10 年来,计算机学科已有了长足发展,这就要求高等学校计算机教育必须跟上形势发展的需要,在课程建设和教材建设上作出相应调整,以适应面向 21 世纪计算机教育的要求。这是组织这套教材的初衷。

为了组织好这套教材,全国高等学校计算机教育研究会课程与教材建设委员会在天津召开了“全国高等学校计算机学科课程与教育建设研讨会”;在北京召开了“教材编写大纲研讨会”。在这两次会议上,代表们深入地研讨了全国高校计算机专业教学指导委员会和中国计算机学会教育委员会制订的《计算机学科教学计划 2000》以及美国 IEEE 和 ACM 的《计算机学科教学计划 2001》。这是这套教材参照的主要依据。

IEEE 和 ACM 的《计算机学科教学计划 2001》是在总结了从《计算机学科教学计划 1991》到现在,计算机学科十年来发展的主要成果的基础上诞生的。它认为面向 21 世纪计算机学科应包括 14 个主科目,其中 12 个主科目为核心主科,它们是:算法与分析(AL)、体系结构(AR)、离散结构(DS)、计算科学(CN)、图形学、可视化、多媒体(GR)、网络计算(NC)、人机交互(HC)、信息管理(IM)、智能系统(IS)、操作系统(OS)、程序设计基础(PF)、程序设计语言(PL)、软件工程(SE)、社会、道德、法律和专业问题(SP)。其中除 CN 和 GR 为非核心主科目外,其他 12 项均为核心主科目。

将 2001 教学计划与 1991 教学计划比较可看出:

在 1991 年计划中,离散结构只作为数学基础提出,而在 2001 计划中,则作为核心主科目提出,显然,提高了它在计算机学科中的地位;

在 1991 计划中,未提及网络计算,而在 2001 计划中,则作为核心主科目提出,以适应网络技术飞速发展的需求;

图形学、可视化与多媒体也是为适应发展要求新增加的内容。

除此之外,2001 计划在下述 5 个方面作了调整:

程序设计语言引论调整为程序设计基础;将人一机通信调整为人机交互;将人工智能与机器人学调整为智能系统;将数据库与信息检索调整为信息管理;将数值与符号计算调整为计算科学。

显然,这些变化使 2001 计划更具有科学性,也更好地适应了学科发展的需要。

在组织这套教材的过程中,充分考虑了这些变化和调整,在软件和硬件的课程体系、界面划分均做了相应的调整,使整套教材更具有科学性和实用性。

另外,还要说明一点,教材建设既要满足必修课的要求,又要满足限选课和任选课的要求。

因此,教材应按系列组织,反映整个计算机学科的要求,采用大拼盘结构,以适应各校不同的具体教学计划的要求,各校可根据自己的需求进行选拼使用。

这套教材包括:《微机应用基础》、《离散数学》、《电路与电子技术》、《电路与电子技术习题与实验指南》、《数字逻辑与数字系统》、《计算机组成原理》、《微机接口技术》、《计算机体系结构》、《计算机网络》、《计算机网络实验教程》、《通信原理》、《计算机网络管理》、《网络信息系统集成》、《多媒体技术》、《计算机图形学》、《计算机维护技术》、《数据结构》、《计算机算法设计与分析》、《计算机数值分析》、《汇编语言程序设计》、《PASCAL 语言程序设计》、《VB 程序设计》、《C 语言程序设计》、《C++ 语言程序设计》、《JAVA 语言程序设计》、《操作系统原理》、《UNIX 操作系统原理与应用》、《LINUX 操作系统》、《软件工程》、《数据库系统原理》、《编译原理》、《编译方法》、《人工智能》、《计算机信息安全》、《计算机图形学》、《人机交互》、《计算机伦理学》等。对于 IEEE 和 ACM 的《计算机学科教学计划 2001》中提出的 14 个主科目这套系列教材均涵盖,能够满足不同层次院校、不同教学计划的要求。

这套系列教材由全国高等学校计算机教育研究会课程与教材建设委员会主任李大友教授精心策划和组织。编者均为具有丰富教学实践经验的专家和教授。所编教材体系结构严谨、层次清晰、概念准确、论理充分、理论联系实际、深入浅出、通俗易懂。

教材组织过程中,得到了哈尔滨工业大学蒋宗礼教授,西安交通大学董渭清副教材、武汉大学张焕国教授、吉林大学张长海教授、福州大学王晓东教授、太原理工大学余雪丽教授等的大力支持和帮助,在此一并表示衷心感谢。

李大友  
2001 年 6 月

# 前 言

通信是人类社会传递信息、交流思想、传播知识的重要手段。当前,人类已进入信息化社会,通信技术正以惊人的速度向前发展。通信与计算机的结合,更为通信技术的飞跃注入了新的生机和活力。现代通信技术和通信网正向数字化、智能化、宽带化、综合化、个人化方向发展,全球一网是现代通信发展的总趋势。

《通信原理》是一门专业基础课的教材,其任务是介绍通信系统的基本原理、基本技术、基本性能和基本分析方法。本书主要介绍现代通信系统所涉及的基本理论和技术,以数字数据通信为主,重点介绍其系统构成、工作原理和主要性能指标。在内容选取上注重基础性、先进性、实用性、系统性和方向性,理论联系实际,努力反映现代通信技术的最新发展。在文字表达上力求条理清楚、深入浅出、通俗易懂、循序渐进。除必要的数学分析外,尽量回避繁琐的数学推导,突出重点,强调物理概念,用直观的图解方法解释物理问题,以便于对讨论内容的理解。

全书共分9章,可划分为五个部分。第一部分包括第1,2章,这一部分是全书的基础,主要讲述通信系统的基本模型、基本指标、信息、信道、传输介质、通信方式、差错控制、信号及噪声的基本原理;第二部分包括第3章的内容,讲述模拟调制的基本原理,它也是第5章数字调制系统的基础。掌握模拟调制的原理,对深入理解数字调制具有重要的作用。因此,本书将模拟调制内容单独作为一部分进行讲述;第三部分包括第4,5章,主要介绍数字数据传输的基本原理和基本技术;第四部分包括第6章的内容,讲述各类通信系统的抗噪声性能,并对它们进行简单比较;第五部分包括第7,8,9章,主要介绍信道复用、多址方式、通信网和同步等内容。各章后均有一定数量的习题,书后附有部分习题答案,供读者参考。书后有4个附录,介绍书中涉及到的有关公式、函数和数表,供读者阅读参考。

本书参考学时数为40~60,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适当的取舍讲授,灵活掌握。

本书自成系统,便于自学,可作为高等学校计算机、通信工程、信息技术和其他相近专业的本科生教材,也可供从事这方面工作的广大科技工作者阅读和参考。

本书由孙学军主编,并编写了第1,2,3,5,6,8,9章;王秉钧编写第4,7章。参加本书编写工作的还有王平、刘健欣、王少勇。

本书由北方交通大学冯玉珉教授担任主审,对本书提出了许多宝贵意见,在此,我们表示诚挚的感谢。

此外,在本书的编写过程中,得到了北京工业大学李大友教授的热情关怀和帮助,还得到电子工业出版社的领导和编辑同志们的支持,在此一并表示深切的谢意。

由于编者水平所限,书中难免存在一些疏漏和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

2001年8月

# 目 录

第 1 章 绪 论 .....	( 1 )
1.1 通信系统模型 .....	( 1 )
1.2 信息及其度量 .....	( 2 )
1.3 信道与信道容量 .....	( 3 )
1.3.1 信道 .....	( 3 )
1.3.2 信道容量 .....	( 4 )
1.3.3 传输介质 .....	( 4 )
1.4 通信方式 .....	( 7 )
1.4.1 串行传输和并行传输 .....	( 7 )
1.4.2 同步传输和异步传输 .....	( 8 )
1.4.3 单工、半双工和全双工传输 .....	( 9 )
1.5 差错控制 .....	( 10 )
1.5.1 差错产生的原因及差错类型 .....	( 10 )
1.5.2 差错控制基本原理 .....	( 11 )
1.5.3 差错控制编码 .....	( 12 )
1.5.4 差错控制方法 .....	( 15 )
1.6 通信系统的主要性能指标 .....	( 17 )
习题一 .....	( 19 )
第 2 章 信号与噪声 .....	( 20 )
2.1 信号的频谱分析 .....	( 20 )
2.1.1 傅里叶级数 .....	( 20 )
2.1.2 傅里叶变换 .....	( 21 )
2.1.3 功率谱密度和能量谱密度 .....	( 24 )
2.1.4 周期信号的功率谱密度 .....	( 25 )
2.2 卷积和相关 .....	( 26 )
2.2.1 卷积 .....	( 26 )
2.2.2 相关 .....	( 27 )
2.3 信号通过线性系统的传输 .....	( 29 )
2.4 随机信号分析 .....	( 31 )
2.4.1 随机过程的概念 .....	( 31 )
2.4.2 平稳随机过程 .....	( 32 )
2.4.3 随机过程的数字特征 .....	( 32 )
2.4.4 平稳随机过程的遍历性 .....	( 34 )
2.5 随机过程的频谱分析 .....	( 35 )
2.5.1 功率谱 .....	( 35 )

2.5.2	功率谱与相关函数的关系	(36)
2.6	随机过程通过线性系统	(37)
2.7	噪声及其通过乘法器的响应	(38)
2.7.1	白噪声	(38)
2.7.2	乘法器的噪声响应	(39)
2.8	窄带噪声	(40)
	习题二	(41)
<b>第3章</b>	<b>模拟调制系统</b>	(44)
3.1	幅度调制	(44)
3.1.1	标准调幅(AM)	(44)
3.1.2	抑制载波双边带调幅(DSB)	(47)
3.1.3	单边带调幅(SSB)	(47)
3.1.4	残留边带调幅(VSB)	(49)
3.1.5	调幅信号的相干解调	(50)
3.1.6	调幅信号的非相干解调	(53)
3.1.7	各种调幅系统的简单比较	(54)
3.2	角度调制	(54)
3.2.1	基本定义	(54)
3.2.2	宽带调频(WBFM)	(56)
3.2.3	宽带调相(WBPM)	(59)
3.2.4	宽带角调波的产生	(59)
3.2.5	宽带角调波的解调	(60)
	习题三	(63)
<b>第4章</b>	<b>基带数字信号及其传输</b>	(67)
4.1	抽样定理	(67)
4.1.1	低通信号的抽样定理	(67)
4.1.2	带通信号的抽样定理	(69)
4.2	脉冲振幅调制(PAM)	(70)
4.2.1	自然抽样	(70)
4.2.2	平顶抽样(瞬时抽样)	(71)
4.3	脉冲编码调制(PCM)	(72)
4.3.1	脉冲调制的基本原理	(72)
4.3.2	量化	(74)
4.3.3	压缩与扩张	(76)
4.3.4	编码	(80)
4.4	增量调制( $\Delta M$ 或DM)	(82)
4.4.1	预测编码的概念	(82)
4.4.2	增量调制( $\Delta M$ 或DM)	(82)
4.5	增量脉码调制(DPCM)	(85)
4.6	自适应差值脉冲调制(ADPCM)	(85)

4.7	数字基带信号的常用码型 .....	(87)
4.8	数字基带信号的频谱分析 .....	(90)
4.9	无码间串扰的基带传输特性 .....	(90)
4.10	眼图和均衡 .....	(95)
4.10.1	眼图 .....	(95)
4.10.2	均衡 .....	(96)
	习题四 .....	(97)
<b>第5章</b>	<b>数字调制系统 .....</b>	<b>(99)</b>
5.1	二进制数字调制系统 .....	(99)
5.1.1	二进制数字调制信号的产生 .....	(99)
5.1.2	二进制数字调制信号的解调 .....	(101)
5.2	二进制数字调制信号的频谱特性 .....	(104)
5.2.1	ASK 信号的功率谱 .....	(104)
5.2.2	FSK 信号的功率谱 .....	(104)
5.2.3	PSK 信号的功率谱 .....	(105)
5.3	多进制数字调制系统 .....	(105)
5.3.1	MASK 系统 .....	(105)
5.3.2	MFSK 系统 .....	(105)
5.3.3	MPSK 系统 .....	(106)
5.4	现代数字调制技术 .....	(110)
5.4.1	正交振幅调制(QAM) .....	(111)
5.4.2	交错正交相移键控(OQPSK) .....	(113)
5.4.3	最小频移键控(MSK) .....	(114)
5.4.4	正弦频移键控(SFSK) .....	(116)
5.4.5	平滑调频(TFM) .....	(117)
5.4.6	调制前高斯滤波的最小频移键控(GMSK) .....	(118)
	习题五 .....	(121)
<b>第6章</b>	<b>通信系统的噪声性能 .....</b>	<b>(122)</b>
6.1	模拟幅度调制系统的噪声性能 .....	(122)
6.1.1	相干解调的噪声性能 .....	(122)
6.1.2	AM 系统非相干解调的噪声性能 .....	(124)
6.2	模拟角度调制系统的噪声性能 .....	(127)
6.2.1	宽带调频(WBFM) 系统的噪声性能 .....	(127)
6.2.2	宽带调相(WBPM) 系统的噪声性能 .....	(129)
6.2.3	调频(FM)的门限效应 .....	(130)
6.2.4	加重技术 .....	(131)
6.3	二进制 PCM 系统的噪声性能 .....	(132)
6.4	无码间串扰基带传输系统的噪声性能 .....	(133)
6.5	最佳基带传输系统的噪声性能 .....	(135)
6.6	数字调制系统的噪声性能 .....	(135)

6.6.1	二进制 ASK 系统的噪声性能 .....	(136)
6.6.2	二进制 FSK 系统的噪声性能 .....	(137)
6.6.3	二进制 PSK 和 DPSK 系统的噪声性能 .....	(139)
6.6.4	二进制数字调制系统的简单比较 .....	(140)
6.7	二进制数字信号最佳接收的噪声性能 .....	(142)
6.7.1	最佳接收的概念 .....	(142)
6.7.2	匹配滤波器与相关器 .....	(142)
6.7.3	二进制数字信号的最佳接收 .....	(145)
	习题六 .....	(147)
<b>第 7 章</b>	<b>信道复用和多址方式 .....</b>	<b>(150)</b>
7.1	频分多路复用(FDM)原理 .....	(150)
7.2	时分多路复用(TDM)原理 .....	(152)
7.3	多址通信方式 .....	(154)
7.3.1	频分多址(FDMA)方式 .....	(154)
7.3.2	时分多址(TDMA)方式 .....	(156)
7.3.3	码分多址(CDMA)方式 .....	(157)
7.3.4	ALOHA 方式 .....	(157)
7.4	码分多址(CDMA) .....	(160)
7.4.1	直接序列扩频码分多址系统 .....	(160)
7.4.2	跳频码分多址系统 .....	(161)
7.4.3	码分多址的主要特点和关键技术 .....	(162)
	习题七 .....	(165)
<b>第 8 章</b>	<b>通信网 .....</b>	<b>(166)</b>
8.1	概述 .....	(166)
8.1.1	通信网的概念 .....	(166)
8.1.2	通信网的功能 .....	(166)
8.1.3	通信网的业务 .....	(167)
8.1.4	通信网的类型 .....	(167)
8.1.5	通信网的发展方向 .....	(167)
8.2	通信网理论基础 .....	(168)
8.2.1	通信网的基本要求 .....	(168)
8.2.2	通信网的拓扑结构 .....	(169)
8.2.3	通信网中的交换技术 .....	(170)
8.2.4	通信网络控制 .....	(175)
8.2.5	通信网的约定 .....	(179)
8.3	基本通信网 .....	(187)
8.3.1	交换网 .....	(187)
8.3.2	广播网 .....	(189)
8.4	现代通信网 .....	(191)
8.4.1	电话网 .....	(192)

8.4.2	计算机通信网	(194)
8.4.3	移动通信网	(195)
8.4.4	综合业务数字网(ISDN)	(198)
8.4.5	宽带 ISDN	(202)
8.4.6	智能网(IN)	(205)
8.4.7	个人通信网(PCN)	(207)
习题八		(208)
第 9 章 同步原理		(210)
9.1	载波同步	(210)
9.1.1	直接提取法	(210)
9.1.2	插入导频法	(210)
9.1.3	非线性变换法	(211)
9.2	位同步	(213)
9.2.1	插入导频法	(213)
9.2.2	直接法	(214)
9.3	帧同步	(217)
习题九		(219)
附录 A 傅里叶变换的一些性质		(221)
附录 B 常用傅里叶变换对		(222)
附录 C 误差函数表		(223)
附录 D 贝塞尔函数表 $J_n(\beta)$		(226)
附录 E 部分习题答案		(227)
参考文献		(231)

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 通信系统模型

通信就是由一地向另一地传递消息,消息的传递是利用通信系统来实现的。通信系统是指完成通信过程的全部设备和传输介质。通信系统有各种各样的形式,其具体设备和业务功能也各不相同。但是,经过抽象和概括,一般都可以用图 1.1 所示的模型来描述。

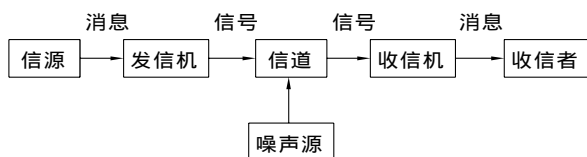


图 1.1 通信系统模型

其中,信源的作用是产生(形成)消息。消息有多种形式,如符号、文字、语音、音乐、数据、图片、活动图像等。消息带有送给收信者的信息。因此,消息是载荷信息的有次序的符号序列(包括状态、字母、数字等)或连续的时间函数。前者称为离散消息,如书信、电报、数据等;后者称为连续消息,如语音、图片、活动图像等。这里“离散”或“连续”是指时间上的离散或连续。

发信机的作用是将消息转换为适合在信道中传输的信号。信号是消息的直接反映,与消息一一对应,因此,信号是消息的载荷者。在电信系统里,它可以由电压、电流或电波等物理量来体现。通信系统中传输的信号,当它为时间的连续函数时,称为“连续信号”,亦称为“模拟信号”。而当载荷信息的物理量(如电信号的幅度、频率、相位等)的改变,在时间上是离散的时,则称为离散信号。如果不仅在时间上离散,而且取值也离散,则称之为数字信号。

消息转换为信号,通常要经过三个步骤,即变换、编码、调制。它们可以分别进行,也可以同时进行。

所谓变换,就是将表达消息的非电量的变化变换为电量的变化。例如电话就是利用送话器把话音压力的变化变换为相应的电流变化。通常要求这类变换设备具有线性特性,即响应与作用成正比。

所谓编码,是指在数字通信系统里,为了某种目的而对数字信号进行的变换。例如用来提高传输有效性的信源编码,用来提高传输可靠性的纠错编码以及用来保密的保密编码等。进行编码的设备称为编码器。

调制在通信系统中主要用来变换信号。从消息变换过来的原始信号称为基带信号(或低通信号),它的特点是其频谱由零频附近开始延伸到某个通常小于几兆赫的有限值。在某些系统中(如市话系统、计算机网络等),基带信号可以直接传输,称为基带传输。但大量的通信系统需要调制,将基带信号变换为更适合于信道传输的形式。例如无线系统中,基带信号必须变换到射频波段才能进行有效的传输,即使在有线信道,有时也需经过调制使信号频率和信道的有效传输频带相适应。调制对通信系统是至关重要的,调制方式在很大程度上能决定系统可

能达到的性能。对此,后面将会讨论。

信道在此是指将信号由发信机传输到收信机的媒介或途径(通道)。信道的种类很多,概括起来有两类,即有线信道和无线信道。信道的传输特性对通信质量有直接影响。

在通信系统中,噪声来源很多,它散布在系统各点,为了分析方便,在图 1.1 中将噪声源集中表示在一个方框里。

收信机的作用与发信机相反:完成解调、解码等任务,将信号转换为消息。

收信者是消息传输的对象,它的作用与信源相反。信源和收信者可以是人,也可以是设备,有时也把它们叫做发终端和收终端。

图 1.1 所示的模型是对各种通信系统的简化概括,它反映通信系统的共性。根据所研究的对象或关心的问题不同,可有不同形式的具体的通信系统模型。例如,对于模拟通信系统,图 1.1 可具体化为图 1.2。

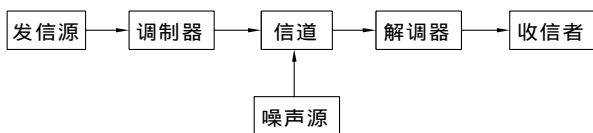


图 1.2 模拟通信系统模型

在模拟通信系统中,发信机简化为调制器,收信机简化为解调器,主要是强调在模拟通信系统中调制的重要作用。从原则上讲,调制和解调对信号的变换起着决定性的作用,它们是保证通信质量的关键。至于其他处理过程都可以看做是理想的,可将它们合并到信道中去。

对于数字通信系统,图 1.1 可具体化为图 1.3。其中信源编码是用来提高传输有效性而对信号采取的处理功能。前面提到的数字加密在此归并到了信源编码器中。信道编码是为了提高传输可靠性的纠错编码。

应当指出,实际数字通信系统并非必须包括图 1.3 中的所有环节,如基带传输系统就不包括调制与解调环节。至于采用哪些环节,取决于具体的设计和要求。此外,在数字通信系统中同步系统是不可缺少的。但因它的位置往往不是固定的,因此图中没有画出。

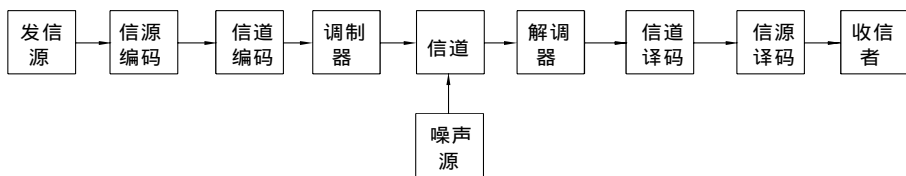


图 1.3 数字通信系统模型

最后应该指出,虽然本节提供的是通信系统最简化的模型,但是它们却决定着通信系统的质量。本课程主要是讨论通信系统的基本原理、技术和性能,解决通信系统中的一些共性问题。因此,本课程的讨论可以说是围绕通信系统模型进行的。

## 1.2 信息及其度量

通信系统中传输的具体对象是消息,但是通信的最终目的是传递信息。因此,在研究具体通信系统之前需要明确信息的含义。

在日常生活中,往往把“信息”和“消息”不加区分。在科学技术上,“信息”的概念是要把实

实际生活中原始的、含糊不清的概念加以提炼、概括、抽象和深化。我们通常把文字、语言、数据、图像等等都看成是“消息”的集合,这些消息集合具有一定的统计特性或概率特性,因而将“信息”定义为对消息统计特性的一种定量描述。更具体地说,当人们得到消息之前,对它的内容有一种“不确定性”,信息就是对这种不确定性的定量描述。

当人们得到消息后,若消息所描述事件发生的可能性越小,就认为这个消息带给他的信息量越大。可见,信息的量值与消息所代表事件的随机性或事件发生的概率有关。从这点出发,信息论利用统计学概念对信息提出了一种度量方法,把度量信息大小的物理量称为信息量,也称信息。

设消息所代表的事件出现的概率为  $P(x)$ ,则该消息所含有的信息量

$$I = \log_a \frac{1}{P(x)} = -\log_a P(x) \quad (1.1)$$

式中,若对数底  $a=2$ ,则信息量的单位为比特(bit),它代表出现概率为  $1/2$  的消息所含有的信息量。在通信系统中,当所传递的消息是两个等概率的消息之一时,任一消息所含有的信息量为 1bit。在实际中,常把一位二进制数字称为 1bit,而不管这两个符号的出现概率是否相等。

## 1.3 信道与信道容量

### 1.3.1 信道

前面把信道定义为发信机和收信机之间用以传输信号的媒介或途径。但是,在通信系统中,为了简化系统的模型和突出重点,常常把信道范围适当扩大,除了传输媒介外,还包括有关的部件和电路,如调制器与解调器等。这种范围扩大了的信道称为广义信道,相应地把仅指传输媒介的信道称为狭义信道。

通信系统中常用的一种广义信道是调制信道,其范围从调制器的输出端至解调器的输入端,如图 1.4 所示。在此之间的一切部件和媒质,都是为了把已调信号由调制器输出端传输到解调器输入端,因此可将其视为传输已调信号的一个整体——调制信道。

在数字通信系统中,如果仅研究编码和解码问题,则可得到另一种广义信道——编码信道。编码信道的范围是从编码器输出端至解码器输入端,如图 1.4 所示。这之间的一切环节都是为了传输数字信号,所以可以把其看成一个整体——编码信道。

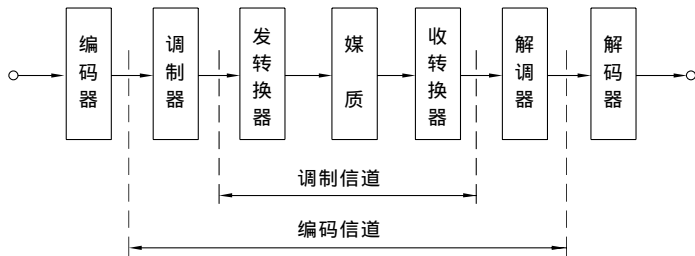


图 1.4 调制信道和编码信道

信道是通信系统中不可缺少的一部分,其特性对信号传输有很大的影响。信道种类繁多,限于篇幅,不再一一介绍。

### 1.3.2 信道容量

对于连续信道,若  $B$  为信道带宽,在加性高斯白噪声的干扰下,根据香农信息论,其信道容量

$$C = B \log_2(1 + S/N) \quad (\text{b/s}) \quad (1.2)$$

其中, $N$  为噪声的平均功率; $S$  是信号的平均功率; $S/N$  为信噪比。信道容量  $C$  是指信道可能传输的最大信息速率(即信道能达到的最大传输能力)。由上式可得出以下结论:

(1) 任何一个信道,都有信道容量  $C$ 。如果信息速率  $R \leq C$ ,理论上存在一种方法,能以任意小的差错概率通过信道传输;如果  $R > C$ ,在理论上无差错传输是不可能的。

(2) 对于给定的  $C$ ,可以用不同的带宽和信噪比的组合来传输。若减小带宽,则必须发送较大的功率,即增大信噪比  $S/N$ ;若有较大的传输带宽,则可用较小的信号功率(即较小的  $S/N$ )来传送。这表明宽带系统表现出较好的抗干扰性。因此,当信噪比太小,不能保证通信质量时,可采用宽带系统,以改善通信质量。这就是带宽换功率的措施。但应指出,带宽和信噪比的互换并不是自动的,必须变换信号使之具有所要求的带宽。实际上这是由各种类型的调制和编码来完成的。调制和编码过程就是实现带宽与信噪比互换的手段。

(3) 由于信息速率  $C = I/T$ ,  $T$  为传输时间,代入式(1.2)则可得

$$I = TB \log_2(1 + S/N) \quad (1.3)$$

可见,当  $S/N$  一定时,给定的信息量可以用不同的带宽和时间  $T$  的组合来传输。和带宽与信噪比互换类似,带宽与时间也可以互换。

### 1.3.3 传输介质

传输介质是通信系统中连接收发双方的物理通路,也是通信过程中消息传送的载体。传输介质分为硬传输介质和软传输介质两类。硬传输介质包括:双绞线、同轴电缆、光缆等。软传输介质包括:无线电波、激光、红外线等。

系统的传输特性和质量,不但与信号性质有关,还与介质的特性有关。当采用硬传输介质时,介质本身的特性对传输极限的影响极为重要。例如,介质本身的带宽就限制了系统的带宽。对于软传输介质,发送信号的带宽对传输特性影响起决定性作用。因为带宽不同,允许的数据传输速率也不同,带宽越宽,数据传输速率越高。

本节就通信系统中常用的传输介质进行讨论,它们是:双绞线、同轴电缆、光缆、无线介质。

#### 1. 双绞线

双绞线是由两根各自封装在彩色塑料皮内的铜线互相扭绞而成的,扭绞的目的是使它们之间的干扰最小。多对双绞线外套一保护套构成双绞线电缆,通过相邻线对间变换的扭距,可使同一电缆内各线对间干扰最小。双绞线分为屏蔽型(STP)和非屏蔽型(UTP)两种类型。其结构示意图如图 1.5 所示。STP 是在 UTP 外面再加上一个由金属丝编织而成的屏蔽层,以提高其抗电磁干扰能力。因此,STP 抗外界干扰性能优于 UTP。但 UTP 要比 STP 价格便宜。相互扭绞的一对双绞线可作为一条通路,其输入阻抗有  $100\Omega$  和  $150\Omega$  两种。双绞线可用于传输模拟

信号,也可用于传输数字信号。电话线就是双绞线的一种。双绞线的带宽取决于铜线的粗细和传输距离。用于传输模拟信号,每隔 5km~6km 需要一级放大;用于传输数字信号每隔 2km~3km 就要用转发器转发一次。双绞线用于远程中继线时,最大传输距离为 15km,用于局域网时,与集线器间的最大距离为 100m。双绞线的抗干扰性能取决于双绞线电缆中相邻线对的扭曲长度及适当的屏蔽。

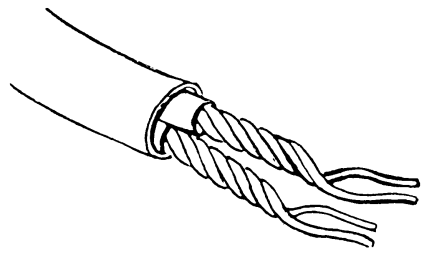


图 1.5 双绞线结构示意图

目前,国际电气工业协会(EIA)对非屏蔽双绞线 UTP 定义了五类质量级别。计算机网络中最常用的是三类和五类 UTP。三类 UTP 的带宽是 16MHz,最高数据传输速率是 16 Mb/s。五类 UTP 的带宽是 100MHz,最高数据传输速率是 100 Mb/s。二者的关键不同在于电缆内每单位长度上的扭绞数。五类 UTP 的扭绞数稍多于三类,其典型值是每英寸 3~4 扭绞;而三类 UTP 的典型值是每英尺 3~4 扭绞。五类 UTP 更紧密的扭绞提供了比三类 UTP 更好的性能,当然价格也比三类 UTP 贵。表 1.1 给出了三类和五类 UTP 以及 150Ω 的 STP 每百米衰减特性的比较。

表 1.1 屏蔽和非屏蔽双绞线的衰减比较 (dB/100m)

频率(MHz)	三类 UTP	五类 UTP	150Ω STP
1	2.6	2.0	1
4	5.6	4.1	2.2
16	13.1	8.2	4.4
25	—	10.4	6.2
100	—	22.0	12.3
300	—	—	21.4

## 2. 同轴电缆

同轴电缆是一种应用非常广泛的传输介质,其结构如图 1.6 所示。它由内导体、外屏蔽层、绝缘层及外保护套组成。其特性由内外导体和绝缘层的电参数、机械尺寸等决定。根据它的频率特性分为两类:视频(基带)电缆和射频(宽带)电缆。基带同轴电缆可用于数字数据信号的直接传输;宽带同轴电缆用于传输高频信号,利用频分多路复用技术可在一条同轴电缆上传送多路信号。

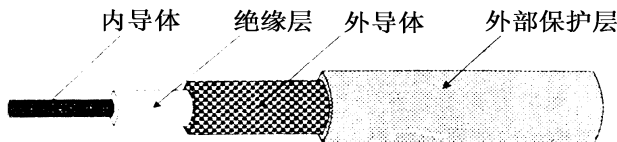


图 1.6 同轴电缆结构示意图

同轴电缆特性阻抗有 50Ω 和 75Ω 两种。50Ω 同轴电缆只用于传输数字基带信号,数据速率可达 10Mb/s。无线电工程多用 75Ω 的宽带电缆,用于传输模拟信号。基带同轴电缆的最

大传输距离一般不超过几千米,而宽带同轴电缆的最大传输距离可达几十千米。由于同轴电缆比双绞线屏蔽性好,故其抗电磁干扰能力强,能在更高速率上传输更远的距离,维护使用亦方便。

### 3. 光缆

光缆是有线传输介质中性能最好、最具发展前途的一种。

光纤是一种直径为  $50\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$  的、柔软的、能传导光波的介质,它可由玻璃或塑料构成,其中使用超高纯度石英玻璃制作的光纤具有最低的传输损耗。在折射率较高的单根光纤外面,再用折射率较低的包层包住,就可以构成一条光通道,外面再加一保护套,即构成一单芯光缆,其结构如图 1.7(a)所示。多条光纤放在一保护套内,就构成一光缆,如图 1.7(b)。

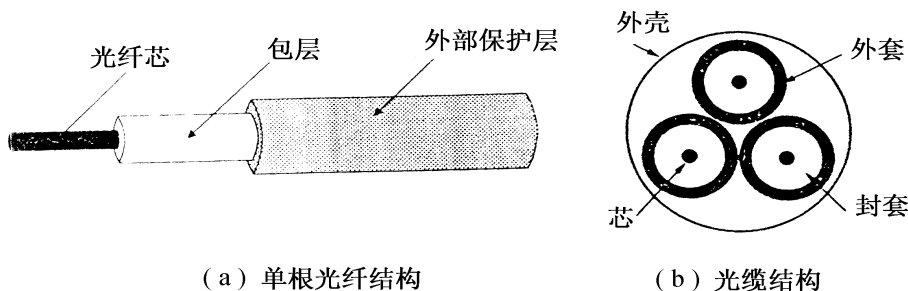


图 1.7 光缆结构示意图

光导纤维通过内部全反射来传输光信号,其传输过程如图 1.8 所示。由于光纤的折射系数高于外部包层的折射系数,因此,可使光波在纤芯与包层界面上产生全反射。以小角度进入光纤的光波沿纤芯以反射方式向前传播。

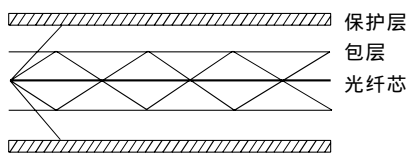


图 1.8 光导纤维传输过程

光纤分为多模与单模两类。所谓多模光纤是指允许一束光沿纤芯反射传播;而单模光纤是指仅允许单一波长的光沿纤芯直线传播,在其中不产生反射。单模光纤直径小,多模光纤直径大;单模光纤价格贵,多模光纤便宜,但单模光纤性能优于多模光纤。

光纤对数据的传输是利用光脉冲的有无来代表数据的 1 和 0 的。典型的光纤传输系统如图 1.9 所示。

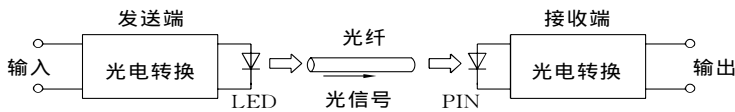


图 1.9 光纤传输系统

在发端,可用发光二极管或激光二极管将电流脉冲转换成光脉冲,然后耦合到光纤中进行

传输。在接收端,利用光电二极管把光纤中传输来的光脉冲再转换为电信号。

光纤具有频带宽,损耗小,数据传输速率高,误码率低,安全保密性好等特点,因此是一种最有发展前途的有线传输介质。

#### 4. 无线传输

无线传输利用大气作为传输介质。目前主要采用三种无线传输技术:微波、红外线和激光。

微波信道的频率范围通常认为是 2GHz~40GHz。由于频带宽,数据传输速率高,对于不同建筑物之间的局域网互联特别适用。目前,微波传输已在无线局域网技术中得到了广泛应用。微波的特点是直线传播。由于地球表面是曲面,微波在地面远距离传输时,必须通过中继接力来实现。

卫星通信也是利用微波频带。由于卫星通信具有通信距离远、费用与通信距离无关、覆盖面积大、不受地理条件的限制、通信带宽宽等优点,是国际干线通信的主要手段。

20 世纪 90 年代以来,随着小卫星技术的发展,出现了中、低轨道卫星移动通信的新方法,作为陆地移动通信系统的补充和扩展,与地面公用通信网有机地结合起来,可实现全球个人移动通信,空间卫星通信网也将对计算机网络技术的发展产生重要的影响。

红外和激光也像微波一样沿直线传播。这三者都需要在收发之间有一条视线(Line-of-sight)通路。三者对环境气候较为敏感,例如对雨、雾、雷电等。相对来说,微波对一般雨和雾的敏感度较低。

### 1.4 通信方式

信号在信道中传输,可采用多种方式,包括:串行传输和并行传输;单工传输、半双工传输和全双工传输;同步传输和异步传输。下面就这些传输方式进行简单介绍。

#### 1.4.1 串行传输和并行传输

##### 1. 串行传输

在串行传输中,数据流的各个比特是一位接一位地在一条信道上传输的。显然,同步是重要的,收发双方要保持位同步和字符同步。在二进制传输方式中,一个比特就是一个码元,一个字符是用几位二进制码的一种组合来表示,这种组合称为码组。串行传输中,收发双方只需要一条传输通道。因此,该传输方式实现容易,也是实际中较为常用的一种传输方式。

##### 2. 并行传输

在并行传输中,一个编码字符的所有比特是同时传送的,码组的每一位都单独使用一条通道,如图 1.10 所示。并行传输通常用于现场通信或计算机与外设之间的数据传输。

并行传输一次传送一个字符,收发之间不存在字符同步问题。长距离传输时,由于并行信道成本高,很少采用,多采用串行信道。所以串行传输存在着并/串、串/并变换问题,即发送端要将计算机中的字符进行并/串变换,接收端再通过串/并变换,还原成计算机的字符结构,如