



国家级职业教育规划教材  
劳动保障部培训就业司推荐

高等职业院校移动通信技术专业

# 通信技术基础

# GNH

Yidong Tongxin Jishu Zhuanye

劳动和社会保障部教材办公室组织编写

GaodengZhiyeJishuYuanxiao



中国劳动社会保障出版社

国家级职业教育规划教材  
劳动保障部培训就业司推荐  
高等职业技术学院移动通信技术专业

# 通信技术基础

主 编 张立中  
副主编 薛晓明

中国劳动社会保障出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

通信技术基础/张立中主编. —北京:中国劳动社会保障出版社, 2008  
高等职业技术学院移动通信技术专业  
ISBN 978-7-5045-6785-7

I. 通… II. 张… III. 通信技术-基本知识 IV. TN91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 030281 号

**中国劳动社会保障出版社出版发行**

(北京市惠新东街 1 号 邮政编码: 100029)

出版人: 张梦欣

\*

北京鑫正大印刷有限公司印刷装订 新华书店经销

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 11.25 印张 261 千字

2008 年 3 月第 1 版 2008 年 3 月第 1 次印刷

定价: 22.00 元

读者服务部电话: 010-64929211

发行部电话: 010-64927085

出版社网址: <http://www.class.com.cn>

**版权专有 侵权必究**

举报电话: 010-64954652

# 前 言

为贯彻落实《国务院关于大力发展职业教育的决定》精神，坚持以就业为导向的职业教育办学方针，推进高等职业技术学院课程和教材改革，劳动和社会保障部教材办公室组织一批学术水平高、教学经验丰富、实践能力强的教师与企业、行业一线专家，共同研究开发了电类专业课程的基础平台，涉及电工基础、模拟电子技术、数字电子技术、电工基本技能、金工实习等课程；还开发了电气自动化技术、应用电子、移动通信技术三个专业模块的课程。在课程开发的同时，编写了电类专业相关教材36种。

在教材的编写过程中，我们贯彻了以下编写原则：

第一，从职业（岗位）需求分析入手，参照国家职业标准《维修电工》《家用电子产品维修工》《电子设备装接工》《家用电器产品维修工》《用户通信终端（移动电话机）维修员》的要求，精选教材内容，切实落实“管用、够用、适用”的教学指导思想。

第二，体现以技能训练为主线、相关知识为支撑的编写思路，较好地处理了理论教学与技能训练的关系，有利于帮助学生掌握知识、形成技能、提高能力。

第三，按照教学规律和学生的认知规律，合理编排教材内容。尽量采用以图代文的编写形式，降低学习难度，提高学生的学习兴趣。

第四，突出教材的先进性，较多地编入新技术、新设备、新材料、新工艺的内容，以期缩短学校教育与企业需要的距离，更好地满足企业用人的需求。

在上述教材的编写过程中，得到有关省市教育部门、劳动和社会保障部门以及一些高等职业技术学院的大力支持，教材的诸位主编、参编、主审等做了大量的工作，在此我们表示衷心的感谢！同时，恳切希望广大读者对教材提出宝贵的意见和建议，以便修订时加以完善。

劳动和社会保障部教材办公室

2006年6月

## 内 容 简 介

本书为国家级职业教育规划教材，根据高等职业技术学院通信技术专业教学计划和教学大纲，由劳动和社会保障部教材办公室组织编写。主要介绍通信技术基础知识，包括通信技术概述、通信系统信号的传输和处理、数字基带传输技术、数字频带传输技术、典型通信系统等内容，与同类教材相比，本书更注重基本概念、基本理论和基本分析方法的介绍，对一些复杂的理论推导进行了删减，具有容易学习和容易掌握的特点。通过本书的学习，读者能够对通信技术基础知识有比较扎实的掌握，为进一步学习专业知识打好基础。

本书为高等职业技术学院应用电子技术专业、通信技术专业、电子信息技术专业教材，也可作为成人高校、广播电视大学、本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校的应用电子技术专业、通信技术专业、电子信息技术专业教材，或作为自学用书。

本书由常州信息职业技术学院张立中主编，常州信息职业技术学院薛晓明副主编，由武汉职业技术学院杨俊主审。

# 目 录

模块一 通信技术概述	( 1 )
课题一 什么是通信	( 1 )
课题二 对通信的要求及通信业务	( 9 )
模块二 通信系统信号的传输和处理	( 13 )
课题一 信号传输方式	( 13 )
课题二 将模拟信号变成数字信号	( 19 )
课题三 让信号传输更快更正确	( 31 )
课题四 传输线路的高效使用方法	( 34 )
模块三 数字基带传输技术	( 52 )
课题一 数字基带信号	( 52 )
课题二 数字基带传输系统	( 64 )
模块四 数字频带传输技术	( 77 )
课题一 二进制数字调制	( 77 )
课题二 多进制数字调制	( 100 )
课题三 定时和同步原理	( 110 )
模块五 典型通信系统	( 126 )
课题一 数字移动通信系统	( 126 )
课题二 数字光纤通信系统	( 145 )
课题三 数字无线电通信系统	( 159 )
参考文献	( 171 )

# 模块一 通信技术概述

## 课题一 什么是通信

### ◆ 知识点

- 通信系统的组成
- 通信系统的分类

### 任务引入

人们要把声音、图像、文字、符号等各种消息传递给接收者，可以采用各种各样的通信方式，其中应用最多的就是电通信。所谓电通信，就是“信源”把要传递的消息首先变成电信号，经过“发送设备”对电信号进行必要处理，使之和信道的特性匹配，更好地通过信道传输到消息的接收者，接收者通过“接收设备”进行完全相反变换，把通过信道传输来的信号变换成原始的电信号，“信宿”把电信号还原成原来的各种声音、图像、文字、符号等原始消息。信号在传输过程中会受到各种干扰和噪声的影响，所以信道总是不理想的，因此需要发送设备和接收设备对信号进行处理。

通信系统的一般模型如图 1—1—1 所示。

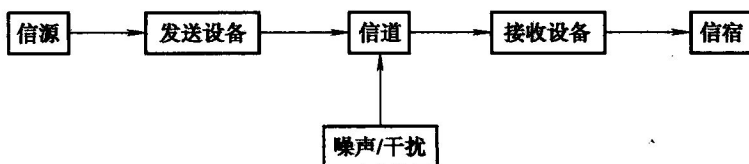


图 1—1—1 通信系统的一般模型

### 相关知识

#### 一、通信系统的组成

##### 1. 信源

信源是信息产生的“源泉”。信源的作用是将各种原始消息转变成电信号，由于电信号具有传递速度快（接近于光速）、传输距离远、消息容量大、处理方便等优点，所以在很多情况下信源都是把各种原始消息，如声音、图像等转换成电信号。电信号是通信信号的主要形式。随着光通信技术的发展，光信号也成为通信的常用信号。

常见的信源设备如图 1—1—2 所示，主要有话筒、数码摄像机、数码相机、计算机、扫描仪、摄像头等。

##### 2. 发送设备

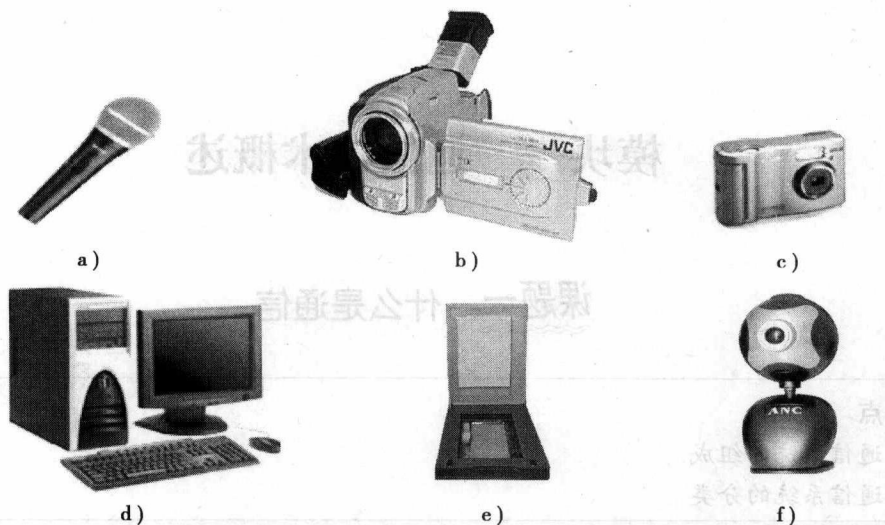


图 1—1—2 常见的信源设备

a) 话筒 b) 数码摄像机 c) 数码相机 d) 计算机 e) 扫描仪 f) 摄像头

发送设备将信源发出的电信号进行适当的处理，目的是方便在信道中传输。处理的方法很多，如对信号进行放大、调制等。理论上讲，信号可以进行变换处理，以适应信道特性，或者改造信道，以适应信源发出的电信号。但是，由于技术、成本、性能等多种因素的制约，在实际应用中多是采用前一种方式。信号处理的具体内容将在模块三、模块四中详细介绍。在实际应用中，发送设备和接收设备组合在一起构成通信设备，如发射机、调制解调器 (Modem) 等。

### 3. 信道

信道是信号传输的通道，又称传输媒介。电信号以电流、电磁波的形式在信道中传播，光信号以光波的形式在光纤中传输。信道可以分为有线信道和无线信道两大类。

(1) 常用有线信道 常用的有线信道有双绞线、同轴电缆、光缆等。

1) 双绞线信道 所谓双绞线就是一对绞合在一起的相互绝缘的导线，如图 1—1—3 所示。双绞线可以作为计算机主机之间的连接线路，就是平常所说的“网线”。用户电话机和端局交换机之间的通信线路也是双绞线，通常称为用户线或外线。双绞线的带宽与导线直径大小、架设的距离远近有关，很多情况下传输速率为几兆位/秒，传输距离可达几千米。

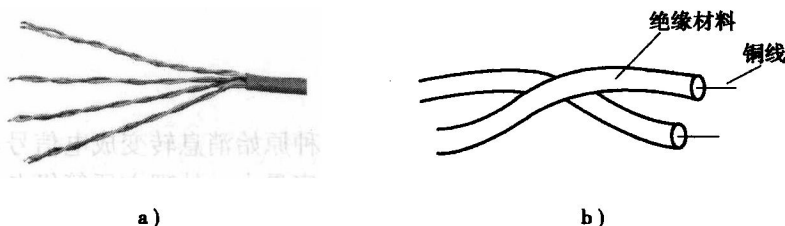


图 1—1—3 双绞线

a) 实物图 b) 结构图

为了线路的敷设方便，生产厂家将 6~3 600 对双绞线封装在一个护套内形成电缆，如图 1—1—4 所示。相邻对线拧成的螺距不同，用来限制相互之间的串音 (Crosstalk)。



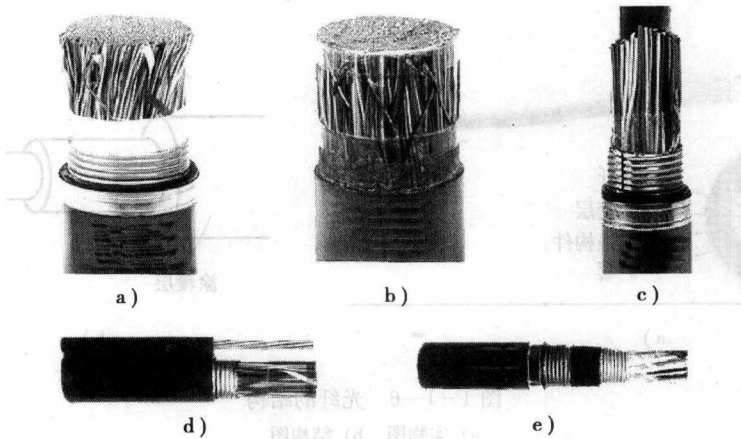


图 1—1—4 电缆

- a) 实心绝缘非填充型电缆 b) 实心绝缘填充型电缆 c) 高频屏蔽型电缆  
d) 自承式电缆 e) 钢带铠装型电缆

2) 同轴电缆信道 同轴电缆 (Coaxial Cable) 的带宽要比双绞线宽得多, 其上限频率由线径和传输距离决定, 一般可达几百兆赫以上, 其衰减与频率的平方根成正比, 因此在远距离传输和宽带工作时需要用到均衡器。同轴电缆目前主要用于局域网 (LAN)、有线电视 (CATV) 和海底电缆通信中。

同轴电缆由内导体、绝缘层、外导体、保护层构成, 由于同轴电缆的特殊结构, 电缆内部的信号不会泄漏到外部, 同样外部的干扰也不会进入到线缆的内部, 因此同轴电缆信道有很好的保密性和抗干扰性, 同轴电缆的结构如图 1—1—5 所示。

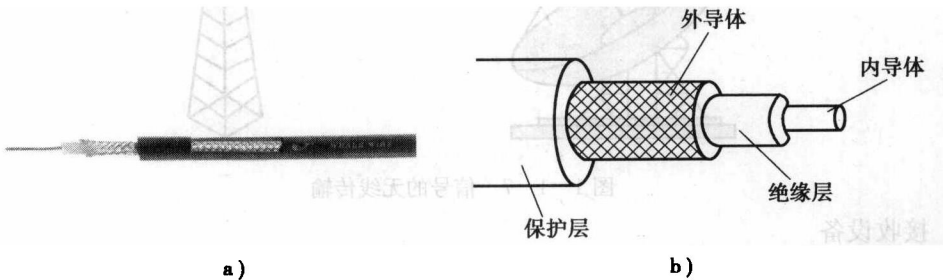


图 1—1—5 同轴电缆的结构

- a) 实物图 b) 结构图

3) 光缆信道 光缆的主要组成部分是光纤, 光纤是由高纯度的石英玻璃制成的, 称为裸光纤, 其直径约为  $125 \mu\text{m}$ 。裸光纤经过涂覆、着色后直径约为  $250 \mu\text{m}$ , 光纤由纤芯、包层、涂覆层组成, 其结构如图 1—1—6 所示。

光纤的纤芯由折射率较高的材料构成, 包层由折射率较低的材料构成。这样, 只要光的入射角足够小, 光信号就能在两层之间产生全反射, 从而在纤芯中传播。

光纤按其工作模式分为多模光纤和单模光纤, 多模光纤的纤芯直径约为  $50 \mu\text{m}$ , 单模光纤的纤芯直径约为  $10 \mu\text{m}$ 。单模光纤具有传输损耗小, 色散小, 可实现长距离、大容量传输等特点, 所以应用越来越广泛。

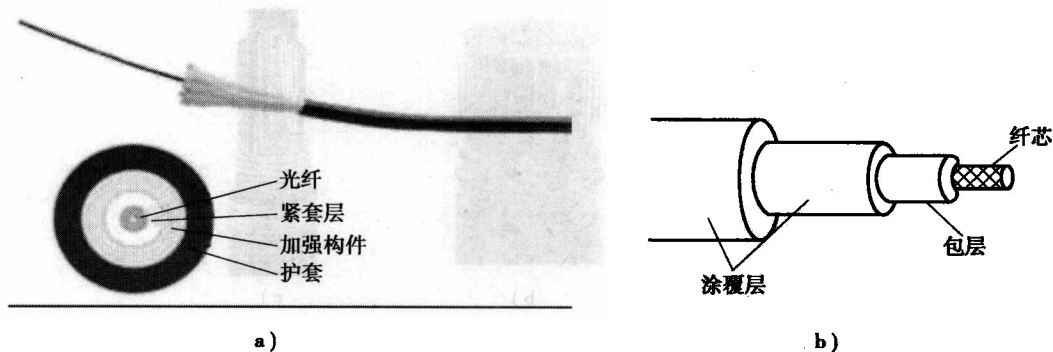


图 1—1—6 光纤的结构

a) 实物图 b) 结构图

光纤一般不单独使用，通常由多根光纤经各种不同工艺加工成不同用途的光缆。光缆的结构也是各种各样的，本书将在模块五中做详细介绍。

(2) 无线信道 无线信道由无形的空间构成，信号以电磁波的形式在无线信道中传播。

无线信道包含从发送端到接收端之间的无线空间，以天线作为信道的接口设备，如图 1—1—7 所示。电信号在无线信道中以电磁波的形式传播，无线信道的频率范围很宽，从极低频一直到微波波段，其中根据频率的不同和传播方式的不同又可分为很多种信道。

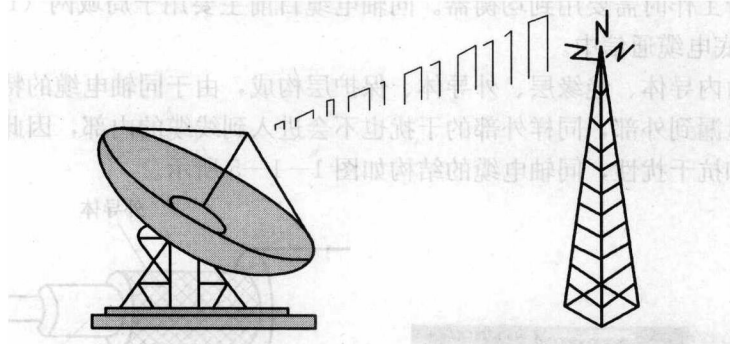


图 1—1—7 信号的无线传输

#### 4. 接收设备

接收设备的作用正好和发送设备的作用相反，通常把接收到的信号经过放大、滤波选择、解调后恢复成原来的基带信号。也就是把经过信道传输的信号恢复成原来的信源产生的信号，接收设备的作用非常重要，能否不失真地恢复原来的信号是关键，本书将在模块三、模块四做详细介绍。

#### 5. 信宿

信宿，顾名思义是信息的归宿。信宿的作用是将来自于接收设备的基带信号恢复成原始信号。如果信源是话筒，要传输的信号是话音信号，则信宿就可能是扬声器或耳机，它将话音信号转换成人耳所能感觉的声音。

一般来说，信源的输出和信宿的输入是相同的，两个设备是对应的。例如，发端是话筒，则接收端是喇叭或耳机；发端是摄像机，则收端是显示器；发端是计算机，则收端也是计算机。

在双向通信中，信源和信宿构成通信终端设备。在终端设备中既有信源又有信宿，如计算机既可以产生信号，又可以接收信号。所以它既是信源，也是信宿。发送设备和接收设备构成通信设备，如调制解调器（Modem），它对要发送的信号进行调制，又对接收的信号进行解调，所以调制解调器既是发送设备也是接收设备。更为典型的例子是手机，在一个机壳内集成了通信设备和终端设备。

## 6. 噪声/干扰

在通信过程中，噪声和干扰是不可避免的。噪声是信道中的噪声以及分散在通信系统各组成部分中的噪声的集中表现。噪声主要来自信道。从某种意义上说，通信工作者的主要工作就是消除噪声和干扰对通信的影响。

## 二、通信系统与通信网络

通信是将信号从一个地方向另一个地方传输的过程。用于完成信号的传递与处理的系统称为通信系统（Communication system）。现代通信要实现多个用户之间的相互连接，就需要将不同的通信系统连接起来。由多个通信系统互连而形成的通信体系称为通信网络（Communication network）。通信网络以交换设备为核心，由通信链路将多个用户终端连接起来，在控制系统的控制下实现多个用户的相互通信。固定电话网的组成示意图如图 1—1—8 所示。

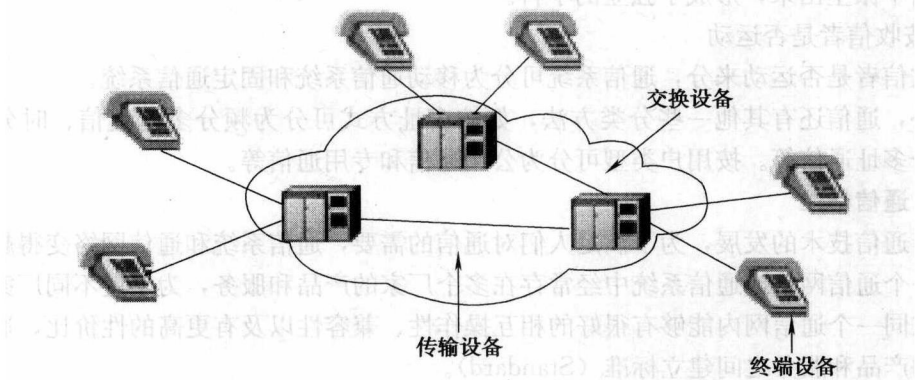


图 1—1—8 固定电话网的组成示意图

常用通信系统的分类方法有以下几种。

### 1. 按传输媒介不同

按传输媒介的不同，通信系统可分为有线通信系统和无线通信系统。有线通信系统可以进一步分为明线通信系统、电缆通信系统、光缆通信系统等。无线通信系统常见的形式有微波通信系统、短波通信系统、移动通信系统、卫星通信系统、散射通信系统等。

### 2. 按信道中所传信号不同

按信道中所传的信号不同，通信系统可分为模拟通信系统和数字通信系统。本书重点介绍数字通信系统。

### 3. 按工作频段不同

按工作频段的的不同，通信系统分类方法更多，如长波通信系统、中波通信系统、短波通信系统、微波通信系统等。

各类通信系统使用的频段见表 1—1—1。

表 1—1—1

各类通信系统使用频段

频段	名称	波长	主要应用场合
30~300 kHz	长波	1~10 km	远距离通信、导航
300~3 000 kHz	中波	0.1~1 km	调幅广播、船舶通信、飞行通信
3~30 MHz	短波	10~100 m	调幅广播、调幅和单边带通信
30~300 MHz	超短波	1~10 m	调频广播、雷达与导航、移动通信
300 MHz 以上	微波	1 m 以下	微波中继通信、卫星通信、移动通信

#### 4. 按调制方式不同

按调制方式的不同，通信系统可以分为基带传输系统和频带传输系统。本书将在模块三详细介绍基带传输系统，在模块四介绍频带传输系统。

#### 5. 按业务不同

按业务的不同，通信系统可分为电报、电话、传真、数据传输、可视电话、无线寻呼等系统。另外，从广义的角度来看，广播、电视、雷达、导航、遥控、遥测等也应列入通信的范畴，因为它们都满足通信的定义。由于广播、电视、雷达、导航等的不断发展，目前它们已从通信中派生出来，形成了独立的学科。

#### 6. 按受信者是否运动

按受信者是否运动来分，通信系统可分为移动通信系统和固定通信系统。

另外，通信还有其他一些分类方法，如按多址方式可分为频分多址通信、时分多址通信、码分多址通信等。按用户类型可分为公用通信和专用通信等。

### 三、通信标准

随着通信技术的发展，为了满足人们对通信的需要，通信系统和通信网络变得越来越复杂，在一个通信网络或通信系统中经常存在多个厂家的产品和服务，为了使不同厂家的产品和服务在同一个通信网内能够有很好的相互操作性、兼容性以及有更高的性价比，通常在不同厂家的产品和服务之间建立标准（Standard）。

按照不同级别，标准可分为企业标准、行业标准、国家标准和国际标准。一般来说，企业标准的要求最高，国际标准要求最低，表 1—1—2 是部分标准代号。

表 1—1—2

部分标准代号

序号	代号	含义	管理部门
1	GB	中华人民共和国强制性国家标准	国家标准化管理委员会
2	GB/T	中华人民共和国推荐性国家标准	国家标准化管理委员会
3	GB/Z	中华人民共和国国家标准化指导性技术文件	国家标准化管理委员会
4	SJ	电子	信息产业部科技司（电子）
5	YD	通信	信息产业部科技司（邮电）
6	Q+*	中华人民共和国企业产品标准	企业

注：\* 表示企业代号。

## 知识链接

### 一、通信发展史

通信发展史见表 1—1—3。

表 1—1—3

通信发展史简表

年 份	事 件
1838 年	摩尔斯发明有线电报
1864 年	麦克斯韦提出电磁辐射方程
1876 年	贝尔发明电话机
1896 年	马可尼发明无线电报
1907 年	电子管问世
1918 年	调幅无线电广播、超外差收音机问世
1925 年	开始利用三路明线载波电话进行多路通信
1936 年	调频无线电广播开播
1937 年	提出脉冲编码调制原理
1938 年	电视广播开播
1940—1945 年	雷达和微波通信系统迅速发展
1946 年	第一台电子计算机在美国出现
1948 年	晶体管面世，香农提出信息论
1950 年	时分多路通信应用于电话
1956 年	铺设了越洋电缆
1957 年	第一颗人造地球卫星上天
1958 年	第一颗人造通信卫星上天
1960 年	发明了激光
1961 年	发明了集成电路
1962 年	发射第一颗同步通信卫星，脉冲编码调制
1960—1970 年	发明了彩色电视；出现高速数字计算机
1970—1980 年	大规模集成电路、商用卫星通信、程控数字交换机、光纤通信系统、微处理器等技术迅速发展
1980 年至今	超大规模集成电路、长波长光纤通信系统、综合业务数字网迅速崛起

### 二、标准化组织

用于全球通信的标准通常由全球性的机构制定，关于通信的国际标准化组织主要有：

#### 1. 国际电信联盟

1865 年 5 月 17 日，法、德、俄、意、奥等 20 个欧洲国家的代表在巴黎签订了《国际电报公约》，国际电报联盟（International Telegraph Union, ITU）宣告成立。1932 年，70

多个国家的代表在西班牙马德里召开会议，制定《国际电信公约》，并决定自 1934 年 1 月 1 日起正式改称为“国际电信联盟”（International Telecommunication Union）。该联盟作为联合国的一个专门机构，其总部设在日内瓦。

联合国的任何一个主权国家都可以成为 ITU 的成员。成员国的政府（多数情况下是其电信管理部门的代表机构）在 ITU 中的地位是平等的，都要承担特别的义务，同时也享有特别的权利（投票权）。

ITU-T 制定的标准被称为“建议书”，意思是非强制性的、自愿的协议。因为它保证了各国电信网的互连和运转，所以越来越广泛地被全世界各国所采用。

## 2. 国际标准化组织

国际标准化组织（ISO）成立于 1946 年，是自发组织起来的一个非官方机构。来自生产商、消费者、政府部门和民间团体的专家，由各成员国向 ISO 推荐，作为本国的代表。尽管 ISO 是一个非官方的组织，但有 70% 以上的 ISO 成员都是根据法律程序组成的政府的标准化机构或组织。其中，美国的代表是美国国家标准学会（ANSI）。

## 3. 美国国家标准学会

美国国家标准学会（ANSI）成立于 1918 年，是一个非营利性组织。其主要目标是协商美国国内自发形成的标准。它的成员包括工业公司、专业团体、商业协会、消费者团体和政府的管理机构。

## 4. 电子工业协会

电子工业协会（EIA）也是一个非营利性组织，致力于促进电子制造业。它的活动不仅有标准开发，而且还包括公共普及教育。

## 思考与练习

### 1. 判断题

- (1) 现代通信限于人与人之间的通信。 ( )
- (2) 卫星通信是一种中继通信。 ( )
- (3) 无线电通信是利用自由空间传播的电磁波来传递信息的通信方式。 ( )
- (4) 通信系统中的噪声影响甚至破坏正常的通信。 ( )
- (5) 光纤通信不属于有线通信。 ( )
- (6) 在通信系统中经过调制后的信号称为基带信号。 ( )

### 2. 填空题

- (1) 通信系统中传输数字信号的通信方式称为\_\_\_\_\_。
- (2) 无线电通信是利用自由空间传播的\_\_\_\_\_传递信息的通信方式。
- (3) 电信号以其波形特征可以为\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_。
- (4) 信号要通过信道才能到达目的地，信道一般分为\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_。

### 3. 画出通信系统的一般模型。

## 课题二 对通信的要求及通信业务

### ◆ 知识点

- 通信系统质量指标
- 信道容量
- 通信的基本业务

### 任务引入

课题一简单介绍了通信系统的组成、通信系统的分类等内容,那么,什么样的通信系统是人们所要求的呢?用什么指标来衡量通信系统的好坏呢?通信系统的基本业务有哪些?

### 相关知识

#### 一、通信系统质量指标

在设计、衡量、比较和评价一个通信系统的优劣时,必然要涉及通信系统的各种性能指标。性能指标也称为质量指标,不同的系统,其质量指标也不同。对于数字通信系统,衡量其优劣的性能指标很多,但归纳起来主要有以下几点:

##### 1. 有效性指标

在数字通信系统中,有效性指标主要用信息的传输速率和符号传输速率来描述,传输速率越高,表示系统的有效性越好。

(1) 信息传输速率 ( $R_b$ ) 信息传输速率又称为比特速率、传信率,是指数字通信系统在单位时间内传输的比特数,用  $R_b$  表示,单位为 bit/s、b/s、bps (比特/秒) 或 kbit/s、kb/s、kbps (千比特/秒),或 Mbit/s、Mb/s、Mbps (兆比特/秒),例如 30/32 路 PCM 基群的总数码率为 2.048 Mb/s。

(2) 符号传输速率 ( $R_B$ ) 符号传输速率又称为码元速率,在数字通信系统中传输的数字信号的一个波形符号就是一个码元。它可能是二进制的,一个码元对应 1 bit 的信息量;也可能是多进制的,例如,在数字调制的 8PSK 中,一个八进制码元所携带的信息量是 3 bit。码元速率是指数字通信系统在单位时间内传输的码元数,用  $R_B$  表示,单位为 Baud 或 Bd (波特)。

数字信号的一个波形就是一个码元,码元宽度 (或码元周期) 为  $T$  秒时,  $R_B = 1/T$ , 如果一个数字通信系统传输的是  $M$  进制码元,则该系统的码元速率  $R_B$  和比特速率  $R_b$  之间的关系为

$$R_b = R_B H(x) \quad (\text{b/s}) \quad (1-2-1)$$

式中,  $H(x)$  是每个符号所含的信息量的统计平均值,即平均信息量。由于其形式与热力学中熵的形式相似,所以通常又称它为信息源的熵,其单位为 bit/符号。关于信息熵的计算超出了本书的讨论范围,这里只给出以下结论:当信息的各个符号相互独立并且是等概率出现时,有

$$R_b = R_B \log_2 M \quad (\text{b/s}) \quad (1-2-2)$$

显然,对于二进制码元存在  $R_b = R_B$ 。

**【例 1—2—1】** 某数据传输系统采用四进制码元以 4 800 Bd 的码元速率传输数据，试确定该系统的信息传输速率。

解：根据信息传输速率是码元速率的  $\log_2 M$  倍的关系，该系统的信息传输速率应为

$$R_b = R_B \log_2 4 = 4\,800 \times 2 = 9\,600 \text{ b/s}$$

**【例 1—2—2】** 如果信源产生的信息传输速率为 900 b/s，该信号在八进制系统中传输，试问这个系统的码元速率应是多少？

解：每个八进制码元携带  $\log_2 M = \log_2 8 = 3$  bit 的信息量，所以

$$R_B = R_b = R_b / \log_2 8 = R_b / 3 = 900 / 3 = 300 \text{ Bd}$$

(3) 频带利用率 ( $\eta$ ) 在数字通信系统中，系统效率单从信道的信息传输速率来评价是不够的，还要用系统信道中单位频带内所实现的信息传输速率来衡量。单位频带内的信息速率称为频带利用率。设  $B$  为信道所需的传输带宽， $R_b$  为信道的信息传输速率，则频带利用率

$$\eta = R_b / B \quad (\text{bps/Hz}) \quad (1-2-3)$$

根据比特率与波特率（码元速率）的关系，进一步可推得

$$\eta = R_B \log_2 M / B \quad (\text{bps/Hz}) \quad (1-2-4)$$

从上可以看出，若码元速率相同，加大  $M$  或减少  $B$  都可使频带利用率提高。前者可采用多进制调制技术实现，后者可采用单边调制、部分响应等压缩发送信号频谱的方法实现。

## 2. 可靠性指标

数字通信系统的可靠性指标主要用传输的差错率来描述。差错率通常用误码率和误比特率来表示。差错率越大，表示系统可靠性越差。

(1) 误码率 ( $P_e$ ) 误码率是指在传输的码元总数中发生错误的码元数所占的比例，用  $P_e$  表示。

$$P_e = \frac{\text{发生错误码元的个数}}{\text{传输总码元数}} \quad (1-2-5)$$

式中，“发生错误码元的个数”和“传输总码元数”均为同一系统同一时间所发生的，显然， $P_e$  为平均误码率。误码率的大小由传输系统特性、信道质量及系统噪声等因素决定。

(2) 误比特率 ( $P_b$ ) 误比特率又称为误信率、比特差错率，是指在传输中发生错误的比特数占传输总比特数的比例，用  $P_b$  表示。

$$P_b = \frac{\text{发生错误的比特数}}{\text{传输的总比特数}} \quad (1-2-6)$$

式中，“发生错误的比特数”和“传输的总比特数”均为同一系统同一时间所发生的，因此， $P_b$  为平均误信率。

在通信系统中传输的各符号一般是独立等概率的，因此常用式  $R_b = R_B \log_2 M$  来表示  $R_b$  与  $R_B$  之间的关系，在二进制系统中  $R_b = R_B$ ， $P_e = P_b$ ，在多进制 ( $M > 2$ ) 系统中一般  $R_b > R_B$ ， $P_e > P_b$ 。

**【例 1—2—3】** 假设信道频带宽度为 1 024 kHz，可以 2 048 kb/s 的比特率传输数据，其频带利用率为多少？信道频带宽度为 2 048 kHz，其频带利用率又为多少？

解： $\eta_1 = R_b / B = 2\,048 / 1\,024 = 2 \text{ bps/Hz}$

$$\eta_2 = R_b / B = 2\,048 / 2\,048 = 1 \text{ bps/Hz}$$



**【例 1—2—4】** 设某通信系统在  $125 \mu\text{s}$  内可传输 256 个二进制码元, 计算其信息传输速率是多少? 若该信息在 4 s 内有 5 个码元产生误码, 试问其误码率等于多少?

解: 其信息传输速率  $R_b = 256 / (125 \times 10^{-6}) = 2.048 \text{ Mb/s}$ 。在数字通信系统中该速率的接口通常称为 2M 口。

误码率  $P_e = \text{发生错误码元的个数} / \text{传输的总码元数} = 5 / (4 \times 2.048 \times 10^6) = 0.62 \times 10^{-6}$

## 二、信道容量

信道容量是指信道极限传输信息的能力, 即信道无差错传输信息的最大信息速率, 记为  $C$ 。信道容量一般分为编码信道容量和调制信道容量, 在实际的通信中主要研究调制信道容量。

调制信道中, 研究的是模拟信号的传输。在加性高斯白噪声背景下, 调制信道的参量是调制信道的带宽、信号功率和高斯白噪声功率。著名的香农 (Shannon) 公式指出了调制信道容量的定量计算方法。

在高斯白噪声干扰下, 调制信道容量采用香农公式计算:

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1-2-7)$$

从式 (1—2—7) 中, 可以看出:

- (1) 调制信道容量三要素为高斯白噪声功率  $N$ 、信号功率  $S$ 、信道带宽  $B$ 。
- (2) 当  $N$  等于 0、 $S$  为常数, 即噪声为 0 时, 信道容量为无穷大; 当  $S$  为无穷大、 $N$  为常数时, 信道容量也为无穷大。
- (3) 加大信道容量的途径是减小  $N$ , 增大  $S$ 。
- (4) 增大带宽  $B$  并不能使信道容量变为无穷大, 因为带宽  $B$  无穷大时, 噪声功率也变为无穷大了。

香农公式具有重大的意义, 它给出了高斯白噪声信道上可靠传输速率的上限。设计实际的通信系统时, 只能尽量接近香农公式计算出的速率, 实现了香农极限速率的系统称为理想通信系统。

香农公式给出了信噪比和信道带宽的关系, 当信道容量一定时, 通过增大带宽可以使系统的信噪比要求下降, 这是扩频通信的理论基础。

**【例 1—2—5】** 话音信道的带宽为 3.4 kHz。(1) 设要求信道的信噪比  $S/N = 30 \text{ dB}$ , 试求这时信道容量为多少? (2) 设话音信道上最大信息传输速率为 4 800 b/s, 试求所需的最小信噪比为多少?

解: (1) 信噪比通常用对数表示, 计算公式为  $10 \lg \frac{S}{N}$ ,  $S/N = 30 \text{ dB}$  表示该信道信号与噪声功率比为 1 000, 所以, 这时的信道容量为

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) = 3\,400 \log_2 (1 + 1\,000) \approx 33\,888.57 \text{ b/s}$$

(2) 只有最大信息速率小于信道容量, 才能实现无差错传输, 则

$$4\,800 \leq 3\,400 \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right)$$

所以 
$$\frac{S}{N} \geq 2^{\frac{48}{34}} - 1$$