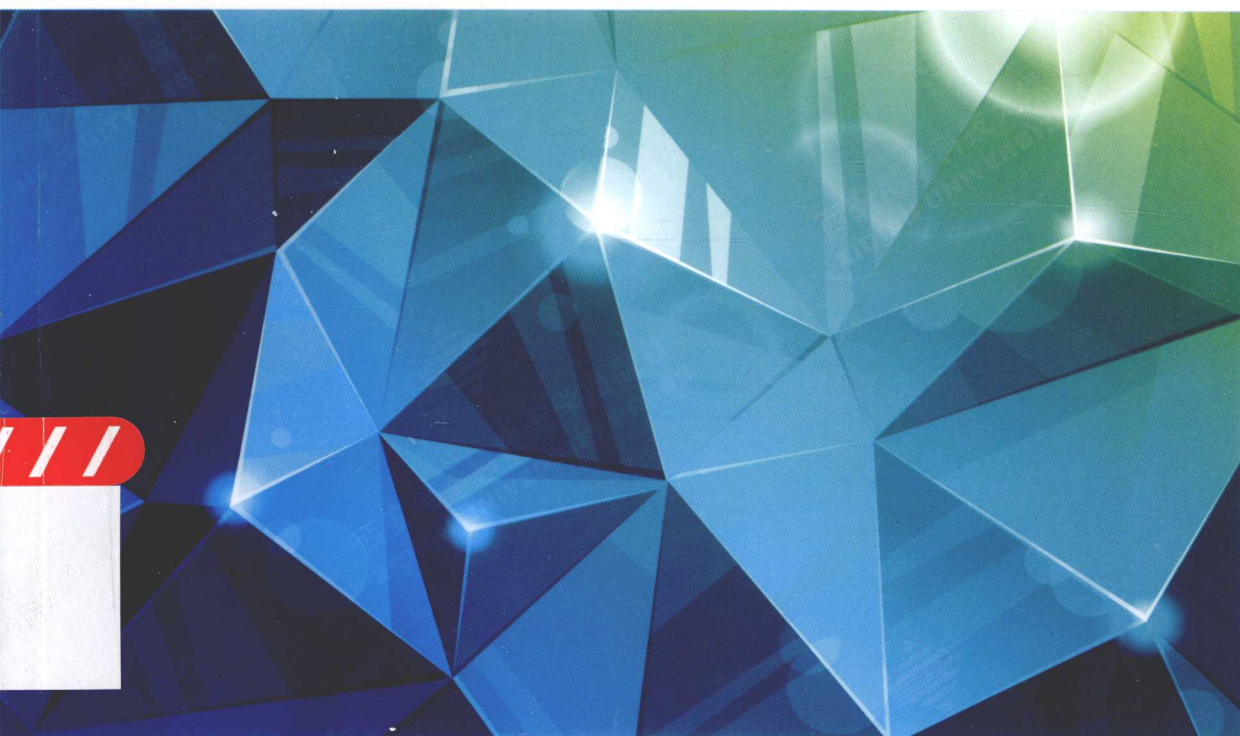




应用型本科 电子及通信工程专业“十二五”规划教材

# 现代通信系统概论

沈卫康 杨小伟 李传森 编著



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

应用型本科 电子及通信工程专业“十二五”规划教材

# 现代通信系统概论

沈卫康 杨小伟 李传森 编著

西安电子科技大学出版社

## 内 容 简 介

本书共6章, 主要内容包括绪论、通信系统基本技术、通信系统的典型应用、交换系统、通信网和通信网的应用。本书从通信的发展历程出发, 由信号到传输再到网络, 以简练易懂的方式对通信技术和通信网进行了全面系统的描述; 同时还列举了一些典型的实例, 以使学生和读者对通信及通信网有一个较全面的认识。

本书可作为本科院校通信工程、电气工程、电子信息以及自动化等专业的学生学习通信知识的教材, 也可作为通信知识入门参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

现代通信系统概论/沈卫康, 杨小伟, 李传森编著. — 西安: 西安电子科技大学出版社, 2015.9  
应用型本科电子及通信工程专业“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5606-3835-5

I. ①现… II. ①沈… ②杨… ③李… III. ①通信系统—概论 IV. ①TN914

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第205528号

策划编辑 马乐惠

责任编辑 马晓娟 马乐惠

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029) 88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2015年9月第1版 2015年9月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 14

字 数 329千字

印 数 1~3000册

定 价 25.00元

ISBN 978-7-5606-3835-5 /TN

**XDUP 4127001-1**

\*\*\*\*\* 如有印装问题可调换 \*\*\*\*\*

本社图书封面为激光防伪覆膜, 谨防盗版。

# 应用型本科 电子及通信工程专业系列教材

## 编审专家委员会名单

**主任：**沈卫康(南京工程学院通信工程学院 院长/教授)

**副主任：**张士兵(南通大学 电子信息学院 副院长/教授)

陈 岚(上海应用技术学院 电气与工程学院 副院长/教授)

宋依青(常州工学院 计算机科学与工程学院 副院长/教授)

张明新(常熟理工学院 计算机科学与工程学院 副院长/教授)

**成 员：**(按姓氏拼音排列)

鲍 蓉(徐州工程学院 信电工程学院 副院长/教授)

陈美君(金陵科技学院 网络与通信工程学院 副院长/副教授)

高 尚(江苏科技大学 计算机科学与工程学院 副院长/教授)

李文举(上海应用技术学院 计算机科学学院 副院长/教授)

梁 军(三江学院 电子信息工程学院 副院长/副教授)

潘启勇(常熟理工学院 物理与电子工程学院 副院长/副教授)

任建平(苏州科技学院 电子与信息工程学院 副院长/教授)

孙霓刚(常州大学 信息科学与工程学院 副院长/副教授)

谭 敏(合肥学院 电子信息与电气工程系 系主任/教授)

王杰华(南通大学 计算机科学与技术学院 副院长/副教授)

王章权(浙江树人大学 信息科技学院 副院长/副教授)

温宏愿(泰州科技学院 电子电气工程学院 讲师/副院长)

郁汉琪(南京工程学院 创新学院 院长/教授)

严云洋(淮阴工学院 计算机工程学院 院长/教授)

杨俊杰(上海电力学院 电子与信息工程学院 副院长/教授)

杨会成(安徽工程大学 电气工程学院 副院长/教授)

于继明(金陵科技学院 智能科学与控制工程学院 副院长/副教授)

# 前 言

通信工程专业培养从事与通信有关的设备制造、电子产品开发、软件开发、通信系统设计、安装调试、故障处理等多方向工作的人才。本专业在教学方面涵盖范围较广,包括通信理论、电子技术、计算机技术、软件技术等。若在大学一年级就开设一门入门级概论课,则不仅可以让学生及早了解通信行业,了解通信业务如何通过通信设备的相关功能得以实现,还可以让学生体会通信设备、通信网系统与通信理论之间的关系。这样一门课程能帮助学生搭建初步知识框架,从而更深入地学好通信专业的知识。

一门课程的开设离不开合适的配套教材。目前国内较常见的通信技术方面的书籍往往侧重通信技术理论而较少涉及通信设备、通信网系统,不能充分满足教学目标的要求,对于刚刚进入大学,缺乏数学和相关专业基础知识的学生而言,学习起来存在一定困难。作为低年级通信概论课程的教材,应对通信的发展历史、基本概念、基本技术、典型设备、典型应用系统等做出概括性介绍和有机串联。

基于以上因素,我们在西安电子科技大学出版社和该社应用型本科系列教材编委的大力支持下,用心编著了本教材。本教材的策划、内容安排及第一章内容的编写由沈卫康完成,第四章由李传森编写,杨小伟完成了第二、三、五、六章的编写及全书的统稿工作。

本教材对技术理论、设备系统、工程应用等内容做了调整平衡,以通信的发展历史、通信的基本业务指标、通信的基本技术为基础,较全面地介绍了典型的通信设备、系统,以及通信网和通信网的实际应用。书中行文适当减少了理论性教学语言,增加了图文描述及生动的典型实例,力求在内容充实的同时深入浅出、通俗易懂。

本书不仅可以作为通信工程专业初学者的专业启蒙教材,也可作为一本通信技术知识普及用书,同时,能为通信工作从业人员提供技术参考。

由于编写时间紧,编者自身水平有限,此书难免存在一些不足,建议读者在使用本书时适当借鉴参考其他相关书籍以相互补充相互完善。若有不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2015年6月于南京工程学院

# 目 录

|                      |    |
|----------------------|----|
| 第一章 绪论               | 1  |
| 1.1 通信发展史            | 1  |
| 1.1.1 电信技术的发展简史      | 1  |
| 1.1.2 通信发展趋势         | 5  |
| 1.2 通信的基本概念          | 6  |
| 1.2.1 消息、信息、信号       | 6  |
| 1.2.2 信息及其度量         | 6  |
| 1.2.3 通信系统组成模型       | 10 |
| 1.2.4 通信系统的分类        | 12 |
| 1.2.5 通信系统的主要性能指标    | 14 |
| 1.2.6 信道与噪声          | 15 |
| 第二章 通信系统基本技术         | 21 |
| 2.1 信源信号             | 21 |
| 2.1.1 常见信号的获取        | 21 |
| 2.1.2 信号的数字化过程       | 24 |
| 2.1.3 数字化过程对信号的影响    | 30 |
| 2.2 信号的基带传输          | 32 |
| 2.2.1 基带传输的基本概念      | 32 |
| 2.2.2 基带传输对码型的要求     | 33 |
| 2.2.3 基带传输系统模型及面对的问题 | 38 |
| 2.3 信号的频带传输          | 44 |
| 2.3.1 频带传输的实现技术      | 44 |
| 2.3.2 数字信号频带传输的实现    | 49 |
| 2.4 信号的复用传输          | 56 |
| 2.4.1 频分复用 (FDM)     | 56 |
| 2.4.2 时分复用 (TDM)     | 57 |
| 2.4.3 码分复用 (CDM)     | 58 |
| 2.4.4 波分复用 (WDM)     | 60 |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 2.5 常用通信系统 .....           | 60         |
| 2.5.1 无线通信系统.....          | 60         |
| 2.5.2 光纤通信系统.....          | 68         |
| <b>第三章 通信系统的典型应用</b> ..... | <b>81</b>  |
| 3.1 无线通信系统的应用 .....        | 81         |
| 3.1.1 微波中继通信.....          | 81         |
| 3.1.2 卫星通信.....            | 88         |
| 3.2 光纤通信系统的典型应用 .....      | 96         |
| 3.2.1 SDH光纤通信系统.....       | 96         |
| 3.2.2 波分复用(WDM)光通信 .....   | 105        |
| <b>第四章 交换系统</b> .....      | <b>109</b> |
| 4.1 概述 .....               | 109        |
| 4.1.1 交换的引入.....           | 109        |
| 4.1.2 交换节点的基本功能.....       | 110        |
| 4.1.3 交换技术的类型.....         | 110        |
| 4.2 交换方式及其特点 .....         | 111        |
| 4.2.1 电路交换.....            | 111        |
| 4.2.2 报文交换.....            | 112        |
| 4.2.3 分组交换.....            | 113        |
| 4.2.4 帧中继 .....            | 114        |
| 4.2.5 ATM交换 .....          | 114        |
| 4.2.6 IP交换 .....           | 115        |
| 4.2.7 软交换.....             | 115        |
| 4.2.8 光交换.....             | 116        |
| 4.3 程控交换基本概念 .....         | 116        |
| 4.3.1 程控交换机硬件组成.....       | 116        |
| 4.3.2 程控交换机软件系统.....       | 120        |
| 4.3.3 数字交换网络.....          | 124        |
| 4.4 数据交换技术 .....           | 129        |
| 4.4.1 分组交换技术.....          | 130        |
| 4.4.2 帧中继技术.....           | 133        |
| 4.4.3 ATM技术 .....          | 135        |
| 4.4.4 软交换.....             | 139        |

|                    |     |
|--------------------|-----|
| <b>第五章 通信网</b>     | 148 |
| 5.1 通信网的概念         | 148 |
| 5.1.1 通信网的定义       | 148 |
| 5.1.2 通信系统与通信网的关系  | 149 |
| 5.1.3 现代通信系统与现代通信网 | 149 |
| 5.1.4 通信网的要求       | 150 |
| 5.1.5 国际网络标准化情况    | 151 |
| 5.2 通信网的组成结构       | 152 |
| 5.2.1 通信网的模型结构     | 152 |
| 5.2.2 通信网拓扑结构      | 155 |
| 5.2.3 通信网分类        | 156 |
| 5.3 通信网的体系结构       | 157 |
| 5.3.1 网络体系结构的概念    | 157 |
| 5.3.2 OSI模型        | 158 |
| 5.3.3 TCP/IP协议模型   | 161 |
| <b>第六章 通信网的应用</b>  | 166 |
| 6.1 典型的通信网组成       | 166 |
| 6.1.1 各种通信网之间的关系   | 166 |
| 6.1.2 传输网          | 167 |
| 6.1.3 业务网          | 169 |
| 6.1.4 支撑网          | 177 |
| 6.1.5 接入网          | 186 |
| 6.2 通信网案例          | 199 |
| 6.2.1 联通通信网        | 199 |
| 6.2.2 电力专用通信网      | 204 |
| 6.2.3 校园网          | 210 |
| <b>参考文献</b>        | 214 |

# 第一章 绪 论

## 1.1 通信发展史

### 1.1.1 电信技术的发展简史

#### 1. 古代通信

利用自然界的基本规律和人的基础感官(视觉、听觉等)可达性建立通信系统,是人类基于需求的最原始通信方式。

广为人知的“烽火传讯(2700多年前的周朝)”、“信鸽传书”、“击鼓传声”、“风筝传讯(2000多年前的春秋时期,公输班和墨子为代表)”、“天灯(代表是三国时期的孔明灯的使用,发展到后期热气球成为其延伸)”、“旗语”以及随之发展依托于文字的“信件(周朝已经有驿站出现,用于传递公文)”都是古代传讯的方式,而信件在较长的历史时期内,都成为人们主要传递信息的方式。这些通信方式,或者是广播式,或者是可视化的、没有连接的,但是都满足现代通信信息传递的要求,或者一对一,或者一对多、多对一。

各种通信方式,随着人类科技的发展,有的消散在历史的潮流中,有的依然在使用,其时间跨度达到4000多年。

1661年,英国亨利·比绍普创制和使用第一个有日期的邮戳。

1840年5月6日,英国发行了世界上第一枚邮票——“一便士黑票”,见图1-1。

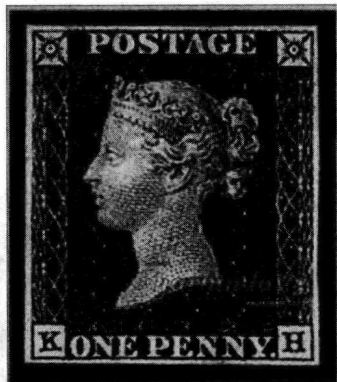


图1-1 世界上第一枚邮票

#### 2. 近现代通信

以电磁技术为起始,是电磁通信和数字时代的开始。19世纪中叶以后,随着电报、电

话的发明和电磁波的发现，人类通信领域产生了根本性的巨大变革，从此，人类的信息传递可以脱离常规的视听觉方式，用电信号作为新的载体，由此带来了一系列新技术革新，开始了人类通信的新时代。利用电和磁的技术实现通信的目的，是近代通信起始的标志，代表性事件如下：

1835年，美国雕塑家、画家、科学爱好者塞缪尔·莫尔斯(Samuel Morse)成功地研制出世界上第一台电磁式(有线)电报机，如图1-2所示。他发明的莫尔斯电码，利用“点”“划”和“间隔”，可将信息转换成一串或长或短的电脉冲传向目的地，再转换为原来的信息。1844年5月24日，莫尔斯在国会大厦联邦最高法院会议厅进行了用莫尔斯电码发出人类历史上第一份电报的实验，从而实现了长途电报通信。

1843年，美国物理学家亚历山大·贝思(Alexander Bain)根据钟摆原理发明了传真机，如图1-3所示。

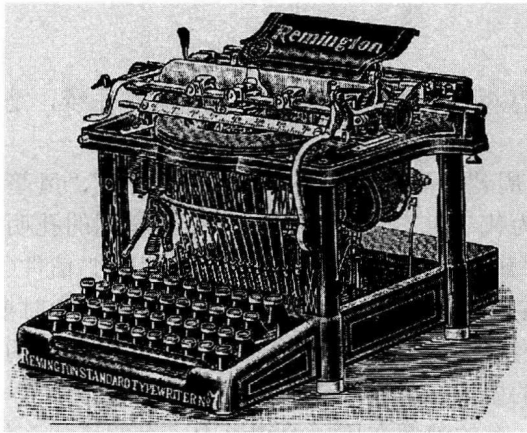


图1-2 第一台电磁式电报机

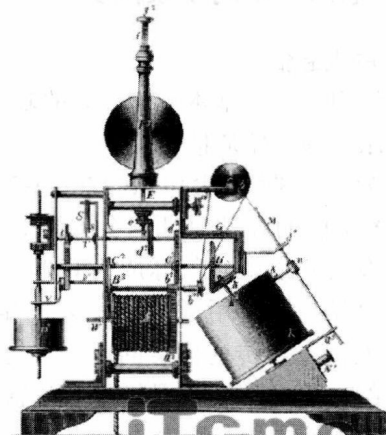


图1-3 传真机

1875年，苏格兰青年亚历山大·贝尔(A.G.Bell)发明了世界上第一台电话机。并于1876年申请了发明专利。1878年在相距300 km的波士顿和纽约之间进行了首次长途电话实验，并获得了成功，如图1-4所示。后来就成立了著名的贝尔电话公司。



图1-4 首次长途电话

1878年，美国在纽黑文开通了世界上最早的磁石式电话总机(也称交换机)，预示磁石

电话和人工电话交换机的诞生。

1880年, 供电式电话机诞生, 通过二线制模拟用户线与本地交换机接通。

1880年以后, 有丹麦人在中国上海创办了中国第一个电话局, 开创了我国通信历史的重要一页, 中国从电话网开始建设电信网。

1885年, 发明了步进式交换机。

1892年, 美国人 A.B. 史端乔(Almon B.Strowger)发明了世界上第一部自动交换机, 这是一台步进式 IPM 电话交换机, 如图 1-5 所示。

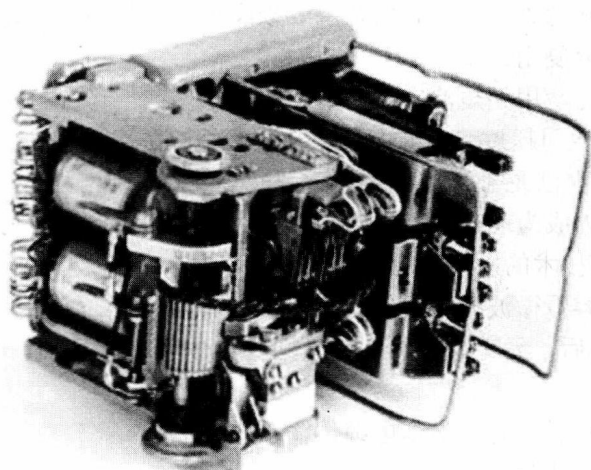


图1-5 自动交换机

电报和电话开启了近代通信历史, 但是都属于小范围内的通信, 更大规模、更快速度的通信在第一次世界大战后得到迅猛发展。

1901年, 意大利工程师马可尼发明火花隙无线电发报机, 如图 1-6 所示, 成功发射穿越大西洋的长波无线电信号。

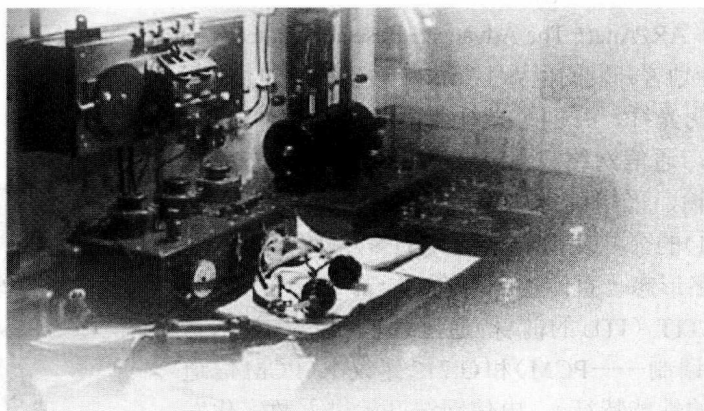


图1-6 无线电发报机

1906年, 美国物理学家费森登成功地研究出无线电广播。

1922年, 16岁的美国中学生菲罗·法恩斯沃斯设计出第一幅电视传真原理图, 1929年申请了发明专利, 被裁定为发明电视机的第一人。

1924年,第一条短波通信线路在德国的瑙恩和布宜诺斯艾利斯之间建立,1933年法国人克拉维尔建立了英法之间和第一条商用微波无线电路,推动了无线电技术的进一步发展。

1928年,美国西屋电气公司的兹沃尔金发明了光电显像管,并同工程师范瓦斯合作,实现了电子扫描方式的电视发送和传输。

20世纪30年代,信息论、调制论、预测论、统计论等都获得了一系列的突破。

1930年,发明超短波通信。

1931年,利用超短波跨越英吉利海峡通话获得成功。

1934年,在英国和意大利开始利用超短波频段进行多路(6~7路)通信。

1935年,发明频分复用技术。

1940年,德国首先应用超短波中继通信。

中国于1946年开始用超短波中继电路,开通4路电话。

1946年,美国宾夕法尼亚大学的埃克特和莫希里研制出世界上第一台电子计算机ENIAC。高速计算能力成为现实,二进制的广泛应用触发了更高级别的通信机制——“数字通信”,加速了通信技术的发展和应

用。

1947年,发明大容量微波接力通信。

20世纪50年代以后,元件、光纤、收音机、电视机、计算机、广播电视、数字通信业都有极大发展。

1956年,建设欧美长途海底电话电缆传输系统。

1957年,发明电话线数据传输。

1959年,美国的基尔比和诺伊斯发明了集成电路,从此微电子技术诞生了。

1962年,地球同步卫星发射成功。

1964年,美国Tand公司Baran提出无连接操作寻址技术,目的是在战争残存的通信网中,尽可能可靠地传递数据报。

1967年,大规模集成电路诞生了,一块米粒般大小的硅晶片上可以集成1千多个晶体管线路,为通信系统的小型化创造了条件。

1969年,美军ARPAnet(The Advanced Research Projects Agency Network)问世,它是为美国国防部高级研究计划署开发的世界上第一个运营的封包交换网络,它是全球互联网的始祖。

1972年,发明光纤,开创了光纤通信的新时代。

1972年以前,通信网络只存在一种基本网络形态,这就是基于模拟传输,采用确定服务,有链接操作寻址和同步转移模式(STM)的公共交换电话网(PSTN)网络形态。这种技术体系和网络形态一直沿用到现在。

1972年,CCTIT(ITU的前身)通过G.711建议书(语音频率的脉冲编码调制——PCM)和G.712建议书(PCM信道音频四线接口间的性能特征),电信网络开始进入数字化发展历程。

1973年,美国摩托罗拉公司的马丁·库帕博士发明第一台便携式蜂窝电话,也就是我们所说的“大哥大”。一直到1985年,才诞生出第一台现代意义上的、真正可以移动的电话,即“肩背电话”,如图1-7所示。



图1-7 第一个蜂窝移动电话

1972年至1980年这八年间,国际电信界集中研究电信设备数字化,这一进程提高了电信设备的性能,降低了电信设备的成本,并改善了电信业务的质量。最终,在模拟PSTN形态的基础上,形成了综合数字网(IDN)网络形态,在此过程中有一系列成就:

- 统一了话音信号数字编码标准;
- 用数字传输系统代替模拟传输系统;
- 用数字复用器代替载波机;
- 用数字电子交换机代替模拟机电交换机;
- 发明了分组交换机。

1977年,美国、日本科学家制成超大规模集成电路,  $30\text{mm}^2$  的硅晶片上集成了13万个晶体管。

1979年,发明局域网。

### 3. 当代通信

当代通信是移动通信和互联网通信时代。

这个时代的特征是,形成了高速数字化通信、全球互联、各种业务融合,通信技术与计算机、人工智能、自动化等技术的融合,极大地促进了人类社会的发展。

1982年,发明了第二代蜂窝移动通信系统,分别是欧洲标准的GSM,美国标准的D-AMPS和日本标准的D-NTT。

1983年,TCP/IP协议成为ARPAnet的唯一正式协议,伯克利大学提出内涵TCP/IP的UNIX软件协议。

20世纪80年代末,多媒体技术的兴起,使计算机具备了综合处理文字、声音、图像、影视等各种形式信息的能力,日益成为信息处理最重要和必不可少的工具,多媒体通信加入到通信技术行列。

1988年,成立“欧洲电信标准协会”(ETSI)。

1989年,原子能研究组织(CERN)发明万维网(WWW)。

20世纪90年代爆发的互联网,更是彻底改变了人类的工作方式和生活习惯。

1990年GSM标准被确定。

1992年,GSM被选为欧洲900MHz系统的商标——“全球移动通信系统”。

2000年,提出第三代多媒体蜂窝移动通信系统标准,其中包括欧洲的WCDMA、美国的CDMA2000和中国的TD-SCDMA。

2007年,ITU将WIMAX补选为第三代移动通信标准。

我们现在就处于当代通信的时代,只要你打开电脑、手机、PDA、车载GPS,很容易实现彼此之间的联系,人们生活更加便利。

#### 1.1.2 通信发展趋势

##### 1. 宽带化

宽带化主要是使通信线路所传输的数字信号的比特率逐渐升高。据估算,人类将所有的知识进行积累以后,通过一条单模光纤,仅仅用不超过五分钟的时间就可传输完成。

##### 2. 4W化

4W(Who、What、Where、When)是指任何人任何事物在任何时候任何地点都可以建立起相互的联系。目前物联网的国际标准化工作已经开始,通信将有力促进社会的发展。

### 3. 智能化

智能网业务将会被广泛使用,它是在原有通信网络的基础上为用户提供新业务而设置的附加网络结构,它的最大特点是将网络的交换功能与控制功能分开。

用户可以自己定制业务,只需要几分钟的时间就能完成功能模块的添加。

### 4. 安全化

模拟信号传递的信息更容易被窃取,数字化之后增加了保密性,同时现在的通信越来越重视信息的加密算法。量子通信技术将为保密通信提供技术保障。

## 1.2 通信的基本概念

### 1.2.1 消息、信息、信号

消息是表达客观物质运动和主观思维活动的状态,指报道事情的概貌而不讲述详细的经过和细节,以简要的语言文字迅速传播新近事实的新闻体裁,也是最广泛、最经常采用的新闻基本体裁,如文字、语言、图像等。消息传递过程即是消除不确定性的过程:收信前,收信者存在不确定(疑问),不知消息的内容;干扰使收信者不能判定消息的可靠性;收信者得知消息内容后,消除原先的“不确定”。消息的三个特点是:真实性、实效性、传播性。

信息指的是消息中所包含的具体内容。信息与消息的关系是:形式上传输消息,实质上传输信息;消息具体,信息抽象;消息是表达信息的工具,信息载荷在消息中,同一信息可用不同形式的消息来载荷;消息可能包含丰富的信息,也可能包含很少的信息。例如,桃花开了,这个事件,它是一种现象,可以作为一个消息,这个现象可以包含春天到来的信息。但是春天到来这个信息也可以用其他消息来载荷,如燕子飞回来了,也表示春天到来这个信息。同时,“桃花开了”包含丰富的信息,它不仅载荷春天到来这个信息,还有“这是一棵成长成熟的果树”等信息。

信号(也称为讯号)是运载消息的工具,是消息的载体。从广义上讲,它包含光信号、声信号和电信号等。例如,古代人利用点燃烽火台而产生的滚滚狼烟,向远方军队传递敌人入侵的消息,这属于光信号;当我们说话时,声波传递到他人的耳朵,使他人了解我们的意图,这属于声信号;遨游太空的各种无线电波、四通八达的电话网中的电流等,都可以用来向远方表达各种消息,这属于电信号。把消息变换成适合信道传输的物理量,如光信号、电信号、声信号和生物信号等,人们通过对光、声、电信号进行接收,就可以知道对方要表达的信息。

对信号的分类方法很多,信号按数学关系、取值特征、能量功率、处理分析方法、所具有的时间函数特性、取值是否为实数等,可以分为确定性信号和非确定性信号(又称随机信号)、连续信号和离散信号、能量信号和功率信号、时域信号和频域信号、时限信号和频限信号、实信号和复信号等。

### 1.2.2 信息及其度量

#### 1. 消息的统计特性

消息可以是离散消息,也可以是连续消息。产生离散消息的信源被称为离散信源,产

生连续消息的信源被称为连续信源。

离散信源只能产生有限种符号，因而离散消息可以看成是一种有限个状态的随机序列，因此我们可以用离散型随机过程的统计特性来进行描述。

设离散信源包含有  $n$  种符号，即  $x_1, x_2, \dots, x_n$  的集合，每个符号出现的概率分别为  $P(x_1), P(x_2), \dots, P(x_n)$ ，则可以用概率场：

$$\begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ P(x_1) & P(x_2) & \dots & P(x_n) \end{pmatrix} \quad \text{即} \quad \sum_{i=1}^n P(x_i) = 1 \tag{1-1}$$

来表示离散信源。例如，英语中 26 个字母以及单词间空格的出现概率如表 1-1 所示，汉字电报的十进制数字代码中，数字 0 ~ 9 的出现概率如表 1-2 所示。

表 1-1 英文字母及空隙出现的概率

| 符 号 | 概 率    | 符 号  | 概 率    | 符 号     | 概 率    |
|-----|--------|------|--------|---------|--------|
| 空隙  | 0.20   | S    | 0.052  | Y, W    | 0.012  |
| E   | 0.105  | H    | 0.047  | G       | 0.011  |
| T   | 0.072  | D    | 0.035  | B       | 0.0105 |
| O   | 0.0654 | I    | 0.029  | V       | 0.008  |
| A   | 0.063  | C    | 0.023  | K       | 0.003  |
| N   | 0.059  | F, U | 0.0225 | X       | 0.002  |
| L   | 0.055  | M    | 0.021  | J, Q, Z | 0.001  |
| R   | 0.054  | P    | 0.0175 |         |        |

表 1-2 汉字电报中数字代码的出现概率

| 数字 | 0    | 1    | 2    | 3     | 4    | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
|----|------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 概率 | 0.26 | 0.16 | 0.08 | 0.062 | 0.06 | 0.063 | 0.155 | 0.062 | 0.048 | 0.052 |

在大多数情况下，离散信号中各符号之间并不相互独立，而往往存在着一定的关联。即当前符号出现的概率与先前出现的符号有关，由此必须用条件概率来描述离散消息。为了简化，通常只考虑前一个符号对后一个符号的影响。这是一个马尔可夫链问题，可以用转移概率矩阵来描述，即

$$\begin{pmatrix} P(x_1 / x_1) & P(x_1 / x_2) & \dots & P(x_1 / x_n) \\ P(x_2 / x_1) & P(x_2 / x_2) & \dots & P(x_2 / x_n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P(x_n / x_1) & P(x_n / x_2) & \dots & P(x_n / x_n) \end{pmatrix} \tag{1-2}$$

连续信源可能产生的消息数目是无限的，其消息取值也是无限的，其统计特性必须用

概率密度函数来反映。消息各点之间的统计关联性可以用二维乃至多维概率密度函数来描述。我们通常只考虑各态历经的平稳随机过程。有关这方面的知识可以参考有关书籍。

## 2. 信源信息的信息量

由概率论我们知道,事件的不确定程度可以用其出现的概率来描述。也就是说,消息中的信息含量与消息发生的概率有关,消息出现的概率越小,则此消息携带的信息就越多。例如,在炎热的夏季,若气象预报说“明天的温度比今天高”,人们习以为常,因而得到的信息量很小;但若气象预报说“明天白天有雪”,人们将会感到十分意外,这一异常的气象预报给人们带来极大的信息量,其原因是在夏季出现这种气候的可能性极小。从这个例子可以明显地看出信息量的大小与消息出现概率的联系。

同样道理,当消息的持续时间增加时,其信息量也随之增加。而且可以认为,一份200字的报文所包含的信息量大体上是一份100字报文的两倍。因此,下列推论是合乎逻辑的:若干独立消息之和的信息量应该是每个消息所含信息量的线性叠加,即信息具有相加性。然而另一方面,对于由有限个符号组成的离散信息源来说,随着消息长度的增加,其可能出现的消息数目却是按指数增加的。例如,二元离散序列中,100位符号所构成的随机离散序列的信息量是200位序列的1/2,但100位序列可能出现的消息数为 $2^{100}$ ,而200位序列可能出现的消息数却为 $2^{200}$ 。

正是基于上述考虑,哈特莱首先提出采用消息出现概率的对数测度作为离散消息的信息度量单位。即某离散消息 $x_i$ 所携带的信息量为

$$I(x_i) = \log_a \frac{1}{P(x_i)} = -\log_a P(x_i) \quad (1-3)$$

式中, $P(x_i)$ 为该消息发生的概率。当 $a$ 为2时,信息量单位称为比特(bit);当 $a$ 为 $e$ 时,信息量单位称为奈特(nit);当 $a$ 为10时,信息量的单位为笛特(Det)。目前应用最为广泛的单位是比特。

**例 1-1** 已知二元离散信源只有“0”、“1”两种符号,若“0”出现概率为1/3,求出现“1”的信息量。

**解:** 由于全概率为1,因此出现“1”的概率为2/3。由信息量定义式(1-3)可知,出现“1”的信息量为

$$I(1) = -\lg \frac{2}{3} = 0.585(\text{bit})$$

**例 1-2** 求英文字母e和j的信息量。

**解:** 由表2-1可知e的出现概率为0.105,故其信息量为

$$I(e) = -\lg 0.105 = 3.24(\text{bit})$$

j的出现概率为0.001,故其信息量为

$$I(j) = -\lg 0.001 = 9.97(\text{bit})$$

如果消息由一串符号构成,且假设各符号的出现互相统计独立,离散信源的概率场如式(1-1)所示,则根据信息相加性概念,整个消息的信息量为

$$I = -\sum_{i=1}^N n_i \lg P(x_i) \quad (1-4)$$

式中,  $n_i$  为第  $i$  个符号出现的次数,  $P(x_i)$  为第  $i$  个符号出现的概率,  $N$  为离散消息源的符号数目。

**例 1-3** 某离散信源由 0、1、2、3 四种符号组成, 其概率场为

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 \\ 3/8 & 1/4 & 1/4 & 1/8 \end{pmatrix}$$

求消息 201 020 130 213 001 203 210 100 321 010 023 102 002 010 312 的信息量。

**解:** 此消息总长为 45 个符号, 其中 0 出现 18 次, 1 出现 11 次, 2 出现 10 次, 3 出现 6 次。由式(1-4)可求得此消息的信息量为

$$\begin{aligned} I &= -\sum_{i=1}^N n_i \lg P(x_i) = -18 \lg \frac{3}{8} - 11 \lg \frac{1}{4} - 10 \lg \frac{1}{4} - 6 \lg \frac{1}{8} \\ &= 25.47 + 22 + 20 + 18 = 85.47(\text{bit}) \end{aligned}$$

### 3. 信源信息的平均信息量

通常通信中传输的消息都很长, 那么用符号出现概率来计算消息的信息量显然是比较麻烦的, 此时我们可以用平均信息量的概念来计算。所谓平均信息量, 是指每个符号所含信息量的统计平均值, 因此  $N$  个符号的离散消息源的平均信息量可用下式表示:

$$H(X) = -\sum_{i=1}^N P(x_i) \lg P(x_i) \quad (1-5)$$

上述平均信息量计算公式与热力学和统计力学中关于系统熵的公式一样, 因此我们也把信源输出消息的平均信息量叫做信源的熵。

**例 1-4** 计算例 1-3 中信源的平均信息量。

**解:** 由式(1-5)得

$$H = -\frac{3}{8} \lg \frac{3}{8} - \frac{1}{4} \lg \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \lg \frac{1}{4} - \frac{1}{8} \lg \frac{1}{8} = 1.9056 \text{ (bit/符号)}$$

注意, 用上述平均信息量可计算出例 1-3 中消息的总信息量为

$$I = 1.9056 \text{ bit/符号} \times 45 \text{ 符号} = 85.752(\text{bit})$$

这里的总信息量与例 1-3 算得的结果并不完全相同, 其原因是例 1-3 的消息序列还不够长, 各符号出现的频次与概率场中给出的概率并不相等。随着序列长度增大, 其误差将趋于零。

当离散信源中每个符号等概出现, 而且各符号的出现为统计独立时, 该信源的平均信息量最大。此时最大熵为

$$H_{\max} = -\sum_{i=1}^N \frac{1}{N} \lg \frac{1}{N} = \lg N \quad (1-6)$$

例如: 例 1-3 中信源的四种符号为等概率, 即每个符号的概率均为  $1/4$ , 则平均信息量为