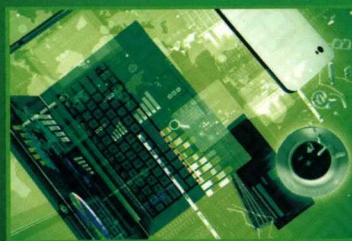
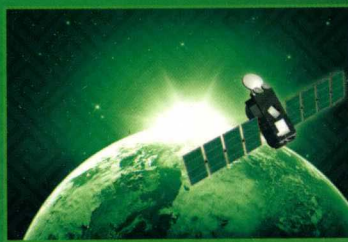


❖ 普通高等教育电子信息类规划教材 ❖

# 现代通信技术概论

## 第3版

INTRODUCTION TO MODERN  
COMMUNICATION TECHNOLOGY



崔健双 主编

通高等教育电子信息类规划教材

# 现代通信技术概论

第3版

崔健双 主编

王丽娜 郑红云 张中山 编著



机械工业出版社

本书比较全面地讲述了现代通信领域的基本技术知识和发展概况。全书按照当代通信领域现实业务的应用状况展开,主要内容包  
括:经典通信基础知识、数字通信系统、程控数字电话交换系统、光  
纤通信系统、数字微波通信系统、卫星通信系统、移动通信系统、数  
字图像通信系统和计算机网络通信系统。

本书适合作为普通高校通信专业低年级学生或非通信专业(如  
计算机工程类、管理工程类、机械类、化工类、经济类等)本科生、  
研究生的专业选修课或公共选修课教材,也可作为高职高专院校相关  
专业教材,或对通信技术感兴趣的有关人员的参考书。

为了教师和工程技术人员电子教学和培训的需要,本书免费提供  
电子课件和习题答案。欢迎使用该教材的教师登录 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)  
免费注册、审核后下载,或联系编辑索取(QQ: 6142415, 电话  
010-88379753)。

## 图书在版编目(CIP)数据

现代通信技术概论/崔健双主编. —3版. —北京:机械工业出版  
社, 2018. 7

普通高等教育电子信息类规划教材

ISBN 978-7-111-60625-3

I. ①现… II. ①崔… III. ①通信技术-高等学校-教材  
IV. ①TN91

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第179758号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:李馨馨 责任编辑:李馨馨

责任校对:王明欣 封面设计:鞠 杨

责任印制:李 昂

河北鹏盛贤印刷有限公司印刷

2018年11月第3版第1次印刷

184mm×260mm·16印张·392千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-60625-3

定价:45.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:[www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线:010-88379649

机工官博:[weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

教育服务网:[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

封面防伪标均为盗版

金书网:[www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

# 前 言

在当今知识经济社会中，伴随着飞速发展的信息化进程，现代通信技术和手段正在渗透到社会的各个领域。人们每天都在通过电视、电话、手机、互联网等日益普及的现代通信工具进行交流。掌握一定的通信知识，了解当代通信技术的基本工作原理，对于无论从事何种专业学习和工作的读者都具有较迫切的愿望和需求。本教材的编写目的正是期望能够让各行各业的读者在有限的时间内，初步掌握现代通信技术的基本内容，了解当代通信技术的总体发展趋势，建立起一个关于通信的概念框架，而这无疑也会为其所从事的工作提供有益的帮助。

本书以介绍当代通信基本技术知识为主，兼顾最新技术知识的介绍。以概论的形式重点突出各类通信系统的基本概念和原理，而不拘泥于琐碎的技术细节。在章节安排上，按照当代通信领域现实业务的应用状况来展开。全书共分为9章，第1章在简要回顾国内外通信发展史的基础上对一些经典的通信知识进行介绍。第2章介绍了数字通信系统的基本知识，包括模拟信号数字化方法、数字信号的基带和频带传输、数字复接与同步技术、差错控制技术等。第3章结合PCM30/32路电话通信系统对程控数字交换网的交换原理进行分析。第4章着重阐述了光纤通信系统，包括光纤的结构、分类以及光波在光纤中的传输机理。第5、6两章分别介绍了数字微波通信系统和卫星通信系统，其中讲到了卫星导航定位系统的基本工作原理。第7章介绍了蜂窝移动通信系统的组成、演进趋势及典型的数字业务，涉及4G与5G关键技术。第8章讲述了数字图像通信系统。第9章对计算机网络通信系统进行了介绍，包括网络体系结构、分组交换技术、局域网、广域网和因特网等内容。

本书第1、2、3、4、9章由北京科技大学崔健双教授编写并负责全书的统稿工作，第5、6章由北京科技大学王丽娜副教授编写，第7章由北京科技大学张中山教授编写，第8章由北京交通大学郑红云副教授编写。本教材计划最低为36课时，授课教师可根据需要对内容和课时进行调整。

本书是作者结合多年的教学实践经验和心得体会编写而成的。在编写内容上参考了相关已出版书籍教材。书末附有参考文献，在此向文献原作者表示衷心的感谢。鉴于编者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

# 目 录

## 前 言

### 第1章 绪论 ..... 1

#### 1.1 通信发展简史 ..... 1

##### 1.1.1 国际通信发展简史 ..... 1

##### 1.1.2 国内通信发展简史 ..... 3

#### 1.2 信号与通信 ..... 4

##### 1.2.1 模拟信号与数字信号 ..... 4

##### 1.2.2 信号的时域和频域特性 ..... 5

##### 1.2.3 信号的带宽 ..... 7

##### 1.2.4 信号的衰耗与增益 ..... 8

##### 1.2.5 噪声与失真 ..... 9

#### 1.3 通信系统的模型与指标 ..... 10

##### 1.3.1 通信系统的一般模型 ..... 10

##### 1.3.2 通信系统的指标 ..... 11

#### 1.4 通信系统的分类 ..... 12

##### 1.4.1 按传输媒介分类 ..... 12

##### 1.4.2 按传输信号的特性分类 ..... 13

##### 1.4.3 按业务功能分类 ..... 13

#### 1.5 通信系统的传输方式 ..... 14

##### 1.5.1 单工与双工传输方式 ..... 14

##### 1.5.2 串行与并行传输方式 ..... 14

##### 1.5.3 同步与异步传输方式 ..... 15

#### 1.6 通信信道 ..... 15

##### 1.6.1 传输特性与带宽 ..... 16

##### 1.6.2 传输媒介 ..... 17

##### 1.6.3 信道容量 ..... 20

##### 1.6.4 信道的复用 ..... 21

#### 1.7 调制与解调 ..... 23

##### 1.7.1 调制的目的 ..... 23

##### 1.7.2 调制的分类 ..... 23

##### 1.7.3 模拟信号调制正弦波 ..... 24

##### 1.7.4 数字信号调制正弦波 ..... 27

#### 1.8 习题 ..... 28

### 第2章 数字通信系统 ..... 30

#### 2.1 数字通信概述 ..... 30

##### 2.1.1 数字通信系统的组成 ..... 30

##### 2.1.2 数字通信系统的特点 ..... 32

#### 2.2 模拟信号数字化 ..... 33

##### 2.2.1 模/数转换 ..... 33

##### 2.2.2 数/模转换 ..... 36

##### 2.2.3 PCM 30/32 路数字电话系统 ..... 36

##### 2.2.4 模拟信号数字化的其他方法 ..... 38

#### 2.3 数字信号的基带传输 ..... 41

##### 2.3.1 基带数字传输系统模型 ..... 41

##### 2.3.2 基带数字传输的码型 ..... 42

##### 2.3.3 无码间干扰的基带数字传输 ..... 45

#### 2.4 数字信号的频带传输 ..... 46

##### 2.4.1 多进制数字调制 ..... 47

##### 2.4.2 复合调制与多级调制 ..... 50

#### 2.5 数字同步与复接技术 ..... 51

##### 2.5.1 数字同步技术 ..... 51

##### 2.5.2 数字复接技术 ..... 52

##### 2.5.3 准同步数字系列 ..... 54

##### 2.5.4 同步数字系列 ..... 54

#### 2.6 数字传输的差错控制 ..... 57

##### 2.6.1 噪声的分类 ..... 57

##### 2.6.2 检错编码 ..... 58

##### 2.6.3 纠错编码 ..... 60

#### 2.7 习题 ..... 61

### 第3章 程控数字电话交换系统 ..... 62

#### 3.1 程控数字电话概述 ..... 62

##### 3.1.1 电话交换的概念模型 ..... 62

##### 3.1.2 电话交换技术发展简史 ..... 63

##### 3.1.3 电话交换的功能模型 ..... 64

##### 3.1.4 电话交换机的基本组成 ..... 65

#### 3.2 程控数字电话交换系统的组成及

##### 工作原理 ..... 65

##### 3.2.1 硬件的基本组成 ..... 66

##### 3.2.2 软件的基本组成 ..... 67

##### 3.2.3 时隙交换与复用线交换 ..... 68

##### 3.2.4 T-S-T 形数字交换网络 ..... 71

##### 3.2.5 程控交换机的主要性能指标 ..... 72

#### 3.3 软交换及软交换系统 ..... 73

##### 3.3.1 软交换的概念 ..... 73

|                           |     |                                |     |
|---------------------------|-----|--------------------------------|-----|
| 3.3.2 软交换系统的组成及功能 .....   | 74  | 6.1.4 卫星通信系统的组成 .....          | 119 |
| 3.3.3 软交换系统的应用 .....      | 75  | 6.1.5 卫星通信系统的分类 .....          | 123 |
| 3.4 习题 .....              | 76  | 6.2 卫星运动轨道 .....               | 123 |
| <b>第4章 光纤通信系统</b> .....   | 77  | 6.2.1 卫星运动的基本规律 .....          | 123 |
| 4.1 光纤通信概述 .....          | 77  | 6.2.2 卫星轨道分类 .....             | 124 |
| 4.1.1 光纤通信发展简史 .....      | 78  | 6.2.3 卫星的摄动 .....              | 125 |
| 4.1.2 光纤通信的特点 .....       | 79  | 6.3 卫星通信的多址方式 .....            | 126 |
| 4.2 光纤与光缆 .....           | 80  | 6.3.1 频分多址 .....               | 126 |
| 4.2.1 光纤的结构与分类 .....      | 80  | 6.3.2 时分多址 .....               | 127 |
| 4.2.2 光纤的导光原理 .....       | 83  | 6.3.3 码分多址 .....               | 127 |
| 4.2.3 光纤的传输特性 .....       | 85  | 6.3.4 空分多址 .....               | 128 |
| 4.2.4 光缆 .....            | 88  | 6.4 VSAT 系统 .....              | 129 |
| 4.3 光纤通信系统 .....          | 89  | 6.4.1 VSAT 网的组成 .....          | 130 |
| 4.4 光纤通信新技术 .....         | 91  | 6.4.2 VSAT 的工作过程 .....         | 131 |
| 4.4.1 光波分复用与光时分复用 .....   | 91  | 6.5 卫星导航定位系统 .....             | 133 |
| 4.4.2 相干光通信 .....         | 92  | 6.5.1 全球定位系统 .....             | 133 |
| 4.4.3 光孤子通信 .....         | 93  | 6.5.2 GPS 伪距单点定位方法 .....       | 135 |
| 4.4.4 光交换技术 .....         | 94  | 6.5.3 Galileo 全球卫星导航定位系统 ..... | 138 |
| 4.4.5 全光通信网 .....         | 96  | 6.5.4 “北斗一号”卫星导航定位系统 .....     | 140 |
| 4.5 习题 .....              | 97  | 6.6 习题 .....                   | 141 |
| <b>第5章 数字微波通信系统</b> ..... | 98  | <b>第7章 移动通信系统</b> .....        | 143 |
| 5.1 数字微波通信概述 .....        | 98  | 7.1 蜂窝移动通信系统演进 .....           | 143 |
| 5.1.1 微波通信发展简史 .....      | 98  | 7.1.1 蜂窝移动通信系统及其组成 .....       | 143 |
| 5.1.2 微波通信的特点 .....       | 99  | 7.1.2 蜂窝移动通信系统演进趋势 .....       | 145 |
| 5.1.3 微波通信系统的分类 .....     | 100 | 7.1.3 蜂窝移动数字业务 .....           | 149 |
| 5.1.4 微波通信的应用 .....       | 100 | 7.2 4G 技术需求 .....              | 151 |
| 5.2 微波的视距传播特性 .....       | 101 | 7.2.1 MIMO 技术 .....            | 151 |
| 5.2.1 天线高度与传播距离 .....     | 101 | 7.2.2 OFDM 技术 .....            | 154 |
| 5.2.2 自由空间传播损耗 .....      | 102 | 7.3 第五代移动通信系统关键技术 .....        | 160 |
| 5.2.3 地面效应和大气效应 .....     | 103 | 7.3.1 5G 技术要求与路线 .....         | 160 |
| 5.3 数字微波通信系统 .....        | 103 | 7.3.2 大规模 MIMO .....           | 163 |
| 5.3.1 中继通信线路与设备组成 .....   | 103 | 7.3.3 非正交多址 .....              | 166 |
| 5.3.2 微波波道及其频率配置 .....    | 106 | 7.3.4 同时同频全双工 .....            | 168 |
| 5.3.3 发信设备 .....          | 110 | 7.3.5 超密集多小区技术 .....           | 171 |
| 5.3.4 收信设备 .....          | 111 | 7.3.6 5G 标准化 .....             | 173 |
| 5.3.5 天馈线系统 .....         | 114 | 7.4 习题 .....                   | 174 |
| 5.4 习题 .....              | 114 | <b>第8章 数字图像通信系统</b> .....      | 175 |
| <b>第6章 卫星通信系统</b> .....   | 115 | 8.1 数字图像通信概述 .....             | 175 |
| 6.1 卫星通信概述 .....          | 115 | 8.1.1 图像通信的特点 .....            | 176 |
| 6.1.1 卫星通信发展简史 .....      | 116 | 8.1.2 图像通信的分类 .....            | 176 |
| 6.1.2 卫星通信的特点 .....       | 117 | 8.1.3 数字图像通信系统的组成 .....        | 177 |
| 6.1.3 卫星通信的工作频段 .....     | 118 | 8.2 数字图像通信基本原理 .....           | 178 |

|                                |            |                                        |            |
|--------------------------------|------------|----------------------------------------|------------|
| 8.2.1 图像信号数字化 .....            | 178        | 9.3.2 局域网的体系结构 .....                   | 209        |
| 8.2.2 数字信号的压缩与编码 .....         | 179        | 9.3.3 总线以太网与 IEEE 802.3<br>标准系列 .....  | 211        |
| 8.2.3 数字图像信号的编码标准 .....        | 182        | 9.3.4 交换式以太网 .....                     | 212        |
| 8.2.4 数字图像的传输 .....            | 186        | 9.3.5 无线局域网与 IEEE 802.11<br>标准系列 ..... | 215        |
| 8.3 数字传真通信 .....               | 190        | 9.4 广域网 .....                          | 219        |
| 8.3.1 传真的分类 .....              | 190        | 9.4.1 广域网概述 .....                      | 219        |
| 8.3.2 传真通信系统的组成及工作<br>原理 ..... | 190        | 9.4.2 X.25 分组交换网 .....                 | 220        |
| 8.3.3 三类传真机 .....              | 191        | 9.4.3 帧中继 (FR) .....                   | 221        |
| 8.4 活动数字图像通信系统 .....           | 192        | 9.4.4 数字数据网 (DDN) .....                | 222        |
| 8.4.1 可视电话 .....               | 192        | 9.4.5 异步传递模式 (ATM) .....               | 224        |
| 8.4.2 数字高清晰度电视系统 .....         | 194        | 9.5 因特网 .....                          | 230        |
| 8.5 习题 .....                   | 196        | 9.5.1 概述 .....                         | 230        |
| <b>第9章 计算机网络通信系统</b> .....     | <b>198</b> | 9.5.2 因特网体系结构 .....                    | 231        |
| 9.1 计算机网络概述 .....              | 198        | 9.5.3 网际层 IP 互联协议 .....                | 233        |
| 9.2 数据通信基础 .....               | 202        | 9.5.4 传输层 TCP 和 UDP .....              | 237        |
| 9.2.1 数据通信概述 .....             | 202        | 9.5.5 应用层协议 .....                      | 240        |
| 9.2.2 数据交换技术 .....             | 203        | 9.5.6 网络未来发展趋势 .....                   | 244        |
| 9.2.3 数据链路控制技术 .....           | 205        | 9.6 习题 .....                           | 245        |
| 9.3 局域网 .....                  | 208        | <b>参考文献</b> .....                      | <b>247</b> |
| 9.3.1 局域网概述 .....              | 208        |                                        |            |

# 第1章 绪 论

## 摘要:

通信是人类文明发展史中一个永恒的话题,通信发展史也是一部人类科技进步史。19世纪中叶以后,人类开创了电气通信新时代,通信手段发生了根本性的变革。

通信系统传送的是消息,而消息通常表现为语音、图像、文字等多种形式。这些形式的消息通过具有某种物理形态的电或光信号作为载体得以传送。因此,了解信号的性质与特征将有助于理解消息的传送过程,周期正弦信号和周期脉冲信号就是两种典型的通信信号。

通信系统的一般模型抽象出了通信系统最基本的功能特征,即把消息从信源传送到信宿,在此过程中难免受到各类噪声的干扰并产生信号的衰减。其中可靠性和传输效率是衡量系统优劣的两个重要指标。按照业务功能划分,通信系统可分为电话通信、电报通信、传真通信、数据通信、图像通信、卫星通信、微波通信、移动通信等。这些系统可以是专用的,但大多数情况下是兼容并存的。

信道是通信信号的传输通路。信道的传输特性即信道的频率响应特性,描述了不同频率的信号通过信道传输后能量幅度和相位变化的情况。信道带宽越大,传输能力越强。信道容量则是用来衡量信道所能达到的最大传输能力的一个重要指标。

在通信系统中,调制的种类很多,分类方法也不一致,但调制的目的只有两个:一是要使得信号匹配信道;二是要实现多路复用,提高线路利用率。

学习经典的通信理论和通信知识对于理解当代各类通信系统的工作原理,掌握更先进的通信技术是十分必要的。本章在简要回顾国内外通信发展史的基础上,对与通信系统技术相关的一些经典的基础知识进行了介绍。主要内容包括通信信号、通信系统模型与指标、通信系统的分类、通信系统的传输方式、通信信道的特性和调制解调等基本概念。通过本章的学习,将使读者在整体上初步建立起关于通信的一些基本概念体系,为后续章节的进一步学习打下牢固的基础。

## 1.1 通信发展简史

通信是人类文明发展历史中一个永恒的话题。早在远古时期,人类就通过简单的语言、图符、钟鼓、烟火、竹简等手段传递信息,烽火狼烟、飞鸽传信、驿站邮递等都是通信的某种表现形式。在当代知识经济社会里,通信行业作为社会经济发展的基础性产业发挥着极其重要的先导性作用。了解通信的发展历史将有助于我们更深入地认识过去、把握现状并展望未来。

### 1.1.1 国际通信发展简史

19世纪中叶以后,由于电报、电话的发明以及电磁波的发现,人类的通信手段发生了

根本性的变革，开创了电气通信新时代。随着科技水平的不断提高，相继出现了无线电、固定电话、移动电话、互联网等各种通信手段，真正让神话传说中的“千里眼”、“顺风耳”变成了现实。先进的通信技术拉近了人与人之间的距离，深刻地改变了社会面貌和人类的生活方式。

回顾通信发展历程，每一次相关重大技术的进步都孕育着通信技术水平的进一步提高。通信发展史也是一部人类科技进步史。

1837 年，美国人莫尔斯展示了世界上第一台电磁式电报机。

1864 年，英国人麦克斯韦预言了电磁波的存在。

1875 年，苏格兰人亚历山大·贝尔发明了世界上第一部电话机。

1901 年，意大利人马可尼成功实现了跨大西洋两岸的无线电通信。

1906 年，美国人费森登研究出无线电广播发送机。

1925 年，美国无线电公司研制出第一部实用的传真机。

1937 年，英国人里夫斯首次提出用脉冲编码调制来进行数字语音通信的思想。

1940 年，美国的古马尔研制出机电式彩色电视系统。

1945 年，英国人克拉克提出静止人造卫星通信的设想。

1946 年，美国人埃克特和莫奇利发明了世界上第一台电子计算机。

1947 年，美国贝尔实验室提出了蜂窝网移动通信的概念。

1957 年，前苏联成功地发射了人类第一颗人造卫星。

1959 年，美国人基尔比和诺伊斯发明了集成电路。

1965 年，第一部由计算机控制的程控电话交换机在美国问世。

1966 年，英籍华人高锟提出以玻璃纤维进行远距离激光通信的设想。

1969 年，在美国投入运行的 ARPA 网形成了互联网的雏形。

1974 年，首次提出传输控制协议/互联网协议（TCP/IP），成为当代互联网的基础。

1977 年，美日科学家研制出超大规模集成电路。

1982 年，欧洲成立了移动通信特别组，制定了泛欧移动通信漫游标准。

1983 年，采用模拟蜂窝技术的先进移动电话系统（AMPS）在美国芝加哥开通。

1991 年，泛欧网数字移动通信系统投入商用。

1993 年，美国政府提出了建设国家“信息高速公路”的建设计划。

1998 年，美国商业部同 Internet 地址分配公司（ICANN）达成协议，将 DNS 管理从美国政府管理逐步转向工业界。

1999 年，黑客入侵、网络攻击、网络病毒、IPv6 等网络信息安全问题提上议事日程。

2001 年，Windows 2000/XP 操作系统风靡全球，后 PC 时代和网络大规模普及时代到来。

2004 年，IBM 公司将个人电脑业务出售给联想公司。

2005 年，YouTube 创立，后被谷歌公司收购，Twitter 和 Facebook 于次年诞生。

2008 年，第一部运行 Android 操作系统的手机诞生，手机通信实现智能化。

20 世纪 80 年代以后，个人计算机的普及以及网络技术的发展标志着互联网时代的到来。数字图像通信、多媒体通信技术的兴起，让通信系统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。卫星通信、移动通信的发展，使得任何一个用户能够随时

随地与其他用户实现通信，通信产业焕发出巨大的生机。

### 1.1.2 国内通信发展简史

我国通信事业经历了从早期非常落后到后来跨越式发展的变化历程，目前已经处于世界先进国家行列。

早在建国初期，我国即开通了首都北京至全国各主要城市的长途通信。1952 年开始在全国主要干线上开通 12 路载波电话，20 世纪 60 年代开始建设 60 路对称电缆载波通信系统。1975 年建成 600 路及 960 路微波接力通信，线路总长达  $1.4 \times 10^4 \text{km}$ ，通达全国 19 个省会和自治区首府，承担了电话/电报通信、报纸传真和电视/广播节目的传送任务。1976 年年初开通了由北京到上海、杭州之间的中同轴 1800 路载波系统。20 世纪 70 年代后期，开始研制光纤通信系统。

20 世纪 80 年代初，随着我国改革开放政策的实施，人们对通信业务的需求日益膨胀，为国内通信事业的快速成长提供了巨大的发展机会。通信业务以超常规、成倍数、跳跃式的发展速度和发展规模取得了令世人瞩目的成就。

1982 年，福州引进开通了第一套万门程控电话交换机。

1983 年，上海率先开通了第一个模拟寻呼系统。

1984 年，东方红二号同步通信卫星发射成功。

1984 年，中外合资上海贝尔电话设备有限公司成立。

1986 年，国家对通信技术设备进口实行 10 年关税减免政策。

1987 年，第一个 TACS 制式模拟蜂窝移动电话系统在广东建成并投入使用。

1988 年，第一个实用单模光纤通信系统（34kbit/s）在扬州、高邮之间开通。

1990 年，第一条长途光缆——宁汉光缆干线工程建成投产。

1991 年，自主研发的 HJD-04 型程控交换机研制成功。此后，以大唐、中兴、华为公司，以及武汉邮电科学研究院等为代表的民族通信制造业实现了群体突破。

1993 年，第一个公用数据通信网——公用分组交换网（CHINAPAC）正式开通。此后陆续开通了公用数字数据网（CHINADDN）和中国公用计算机互联网（CHINANET）。

1993 年，第一条国际光缆——中日海底光缆投入使用。

1994 年，广东开通了 GSM 数字蜂窝移动电话网。

1995 年 7 月，联通 GSM 130 数字移动电话网在北京、天津、上海、广州建成开通。

1996 年，移动电话实现全国漫游，并开始提供国际漫游服务。

1998 年，正式向国际电联（International Telecommunication Union, ITU）提交第三代移动通信标准（简称 3G）——TD-SCDMA，该标准成为第一个具有自主知识产权并被国际上广泛接受和认可的无线通信国际标准。

1999 年，第一条传输速率为  $8 \times 2.5 \text{Gbit/s}$  的密集波分复用（DWDM）系统开通。

2000 年，中国提出的第三代移动通信制式 TD-SCDMA 被批准为 ITU 的正式标准。

2002 年，中国移动通信 GPRS 业务正式投入商用，中国移动迈入 2.5G 时代。

2006 年，TD-SCDMA 被宣布为我国的国家通信行业标准。

2007 年，信息产业部发布 WCDMA、cdma2000 两项通信行业标准。

2009 年，3G 牌照正式发放，中国电信、中国移动、中国联通分别获得 WCDMA、cd-

ma2000 和 TD-SCDMA 牌照。

2010 年，全国首个具有 4G 特征的 TD-LTE 演示网在上海世博园建成开通。

2011 年，国内六城市启动 TD-LTE 规模性试验，7 家系统、3 家芯片厂商基本完成测试。

2012 年 12 月，中国移动在香港正式启动 4G 网络商用，并与深圳实现 TD-LTE 网络间数据漫游业务，正式拉开我国 4G 序幕。

2013 年 12 月，中国 4G 牌照正式发放，三大运营商均获 TD-LTE 牌照。

2015 年，IMT-2020 (5G) 推进组发布 5G 概念白皮书，为国际 5G 标准制定贡献了力量。标志着中国从 3G/4G 的跟随世界标准向引领世界标准迈进。

2018 年，国际标准化组织批准了第五代移动通信技术新空口 (5G NR) 的独立组网标准。中国移动也将在当年建设 5G 应用试验示范网，逐渐推进 5G 商用。与此同时，6G 移动通信太赫兹通信技术方向性研究工作陆续展开。

目前来看，我国通信行业已经形成了中国移动、中国联通、中国电信三大电信运营商互相竞争、互相合作的格局，促进了我国通信行业的健康发展和良性循环。

自 1987 年中国电信开办移动电话业务以来，每年用户增长速度均在 200% 以上。中国移动通信用户总数已经跃居为世界第一位。固定电话和手机普及率已超过 8 成，用户总数合计接近 12 亿。互联网用户总数超过 7 亿，已经成为世界上名副其实的通信大国。

回顾国内外通信发展史，不难看出未来通信产业发展的一些显著特征：伴随着一系列新技术的不断涌现，通信技术和手段会进一步得到提升。以光电信号作为信息的载体，以微电子学和光电技术为基础，结合计算机技术、网络信息处理技术，预示着高速、宽带、无缝连接的数字化信息时代即将到来。

## 1.2 信号与通信

通信系统传送的是消息，而消息只有附着在某种物理形式的载体上才能够得以传送。这类物理形式的载体通常表现为具有一定电压或电流值的电信号或者一定光强的光信号，它们作为携带消息的媒介统称为通信信号，简称信号。

从数学的角度来看，信号可以描述为瞬时幅度（电压、电流等）随时间变化的函数，称为幅度时间特性，也可以描述为能量幅度随频率变化的函数，称为幅度频率特性。从物理的角度来看，通信的过程可以理解为携带消息的信号通过变化的消息对信号施加“影响”，并让接收端能够“感知到”这个影响，从而检测并获得消息，达到“携带”的目的。因此，只有深入了解信号的性质与特征，才能进一步理解消息的传送过程。

### 1.2.1 模拟信号与数字信号

模拟信号与数字信号是通信系统中最常见的两类信号。信号幅度在某一范围内可以连续取值的信号，称为模拟信号；而信号幅度仅能够取有限个离散值的信号称为数字信号。例如，电话机送话器根据声音高低的变化，通过膜片压迫碳粒来产生强弱变化的电“模拟”信号，该信号的幅度在一定范围内是连续变化的，因而属于模拟信号。图 1-1a 是一种既在幅值上连续又在时间上连续的模拟信号。图 1-1b 是把图 1-1a 按照周期  $T$  抽样得到的抽样信号，这种信号又称为脉冲幅度调制信号（Pulse Amplitude Modulation, PAM），常用于模拟信

号数字化过程。PAM 信号虽然在时间上是离散的，但在幅值上仍然是连续的，因此仍然是模拟信号。

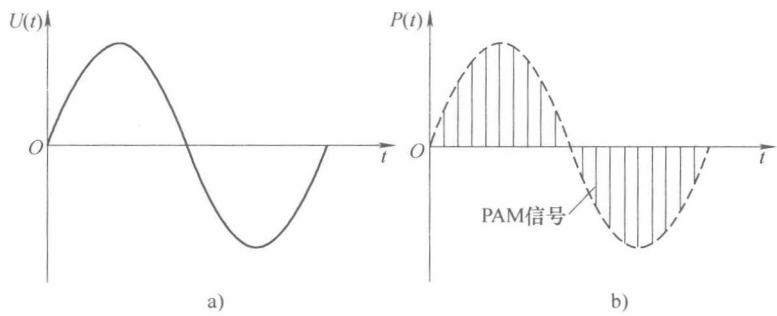


图 1-1 模拟信号

a) 时间和幅值都连续 b) 时间离散但幅值连续

模拟信号所代表的消息通常表现在信号外在波形参量的变化上，因此传送过程中不能出现严重的波形畸变，否则很难完整地恢复为原始信息的内容。

图 1-2a 表现的是由三个脉冲码元形成的二进制数字信号，每一个码元的幅度只可能取两个值：-1V 或 +1V。如果以 +1V 代表逻辑“1”，以 -1V 代表逻辑“0”，则二进制数字信号就是由非“0”即“1”组成的信号，这是一种最常用的数字信号。图 1-2b 是一种多进制数字信号，该信号取 4 个电压值：+1V，-1V，+2V，-2V。若每个电压值代表一种两位的二进制组合，则可以表示出 4 种组合状态：“00”（+1V），“01”（+2V），“10”（-1V），“11”（-2V），称为四进制数字信号。

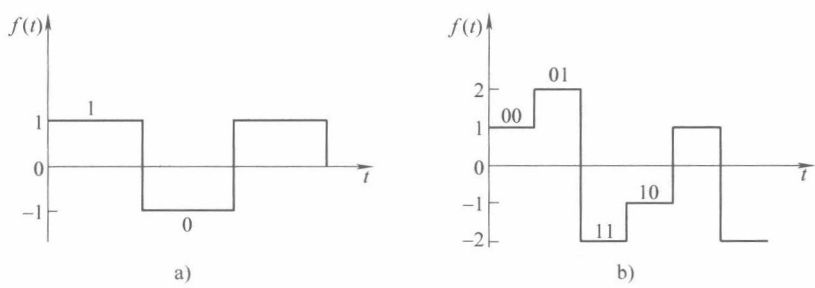


图 1-2 二进制和四进制数字信号

a) 二进制数字信号 b) 四进制数字信号

### 1.2.2 信号的时域和频域特性

#### 1. 周期正弦信号和周期脉冲信号

周期正弦信号  $u(t) = A\sin(2\pi ft + \psi)$  是一种频率单一、幅值固定的模拟信号，这样的信号常被用作“携带”（载波）消息的信号，如图 1-3a 所示。其中幅度  $A$ 、频率  $f=1/T$  和相位  $\psi$  是三个重要的表征参数。若把消息“作用”到这三个参数中的任意一个之上，使其随着消息的变化而变化，就会使信号“携带”上所需要传送的消息。

周期脉冲信号是一种幅度为  $A$ 、周期为  $T$ 、宽度为  $\tau$  的重复出现的矩形波信号，如图 1-3b 所示。简单地说，脉冲是一种电压（或电流）幅度在上升和下降过程中瞬间变化

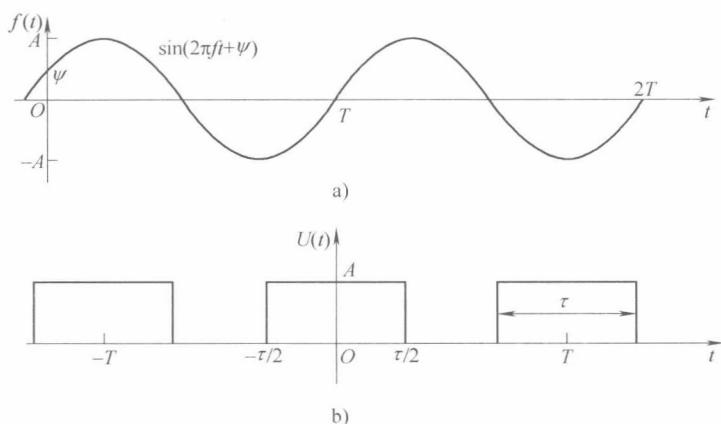


图 1-3 周期正弦信号和周期脉冲信号

a) 周期正弦信号 b) 周期脉冲信号

比较剧烈的信号。图 1-3b 中展示的是一种理想状态的脉冲，每一位码元的上升或下降都呈  $90^\circ$  变化。实际中不存在这样的脉冲，因为信号电压的高低跳变总是需要一定时间的。但若电压跳变时间相对于其维持在高或低位的持续时间很短，可以近似认为是理想脉冲而不会影响对问题性质的判断。

信号的振幅是指信号在各个瞬间时刻强弱变化的轨迹，单位可以取电压的单位 (V) 或电流的单位 (mA)。在图 1-3a 中，信号振幅范围从  $+A \sim -A$  连续变化，而图 1-3b 中周期脉冲信号的振幅是离散变化的，只能取  $A$  或  $0$ 。

信号的频率可以理解为单位时间内相同波形重复出现的次数。正弦信号的频率  $f$  是其周期  $T$  的倒数，单位是 Hz。但是对于周期脉冲信号来说，不能简单地把脉冲波形重复出现的次数认为就是构成该信号的全部频率。事实上，周期脉冲信号的频率分析是以傅里叶级数理论为基础的。根据傅里叶级数分析，周期脉冲信号是由许多类似于正弦信号的不同幅度的频率分量叠加组成的。图 1-4 表现了由信号  $\sin(2\pi ft)$  及其 3 次和 5 次谐波叠加获得的近似周期矩形波的图形，谐波次数越多，叠加后的波形就越能够逼近矩形波。

信号的相位指的是信号在一个周期内起始点的位置，用弧度表示。以正弦波形为例，若把时间轴  $t$  做一个横向剖面来观察不同时刻该信号的振荡变化，可以发现其幅度随时间起伏变化的规律。把该剖面按照角度坐标系分割成  $360^\circ$ ，则信号振幅的大小和方向无时不在发生变化，在起始点  $0^\circ$  时，振幅为  $0$ ， $45^\circ$  时振幅为  $A/2$ ， $90^\circ$  时振幅达到  $A$ ，而  $270^\circ$  时振幅为  $-A$ 。相位的改变意味着在振荡周期起始点那一瞬间让信号的振幅值发生改变。

## 2. 信号的时域特性

信号的时域特性表达的是信号幅度随时间变化的规律。例如，图 1-3 是正弦波和周期脉冲信号的时域波形，简称为幅时特性。

信号的幅时特性也可以用数学表达式来描述。例如，图 1-3a、b 可以分别表达为

$$f(t) = \sin(2\pi ft + \psi) \quad -\infty \leq t \leq +\infty \quad (1-1)$$

$$u(t) = \begin{cases} A, & \left(-\frac{\tau}{2} + nT \leq t < nT + \frac{\tau}{2}, n \in \mathbb{N}\right) \\ 0, & \text{其他时间} \end{cases} \quad (1-2)$$

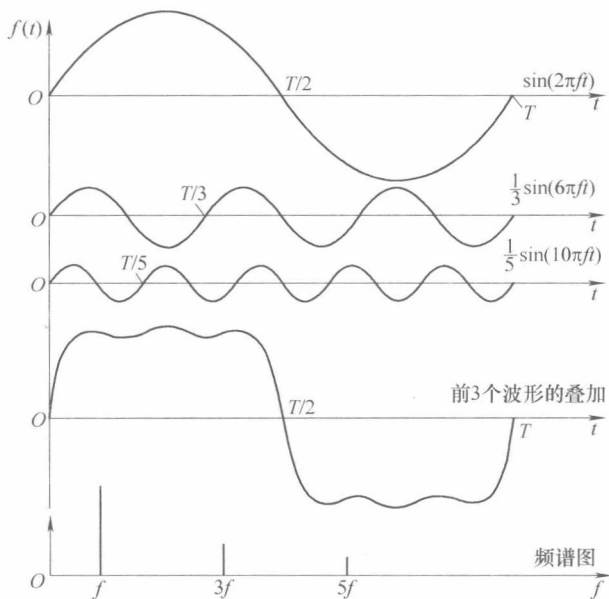


图 1-4 正弦信号谐波叠加逼近矩形波信号

### 3. 信号的频域特性

信号的频域特性表达的是信号幅度和相位随频率变化的规律，根据傅里叶级数理论，周期为  $T$  的任意周期函数  $u(t)$ ，均可以表示为直流分量和无限多个正弦及余弦函数之和，即

$$u(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n2\pi ft) + b_n \sin(n2\pi ft)] \quad (1-3)$$

图 1-3b 所示的周期脉冲信号由傅里叶级数分解展开后，其傅里叶级数中只包含直流分量和余弦项，不存在正弦项，即

$$u(t) = \frac{A\tau}{T} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2A\tau}{T} \frac{\sin(n\pi\tau/T)}{n\pi\tau/T} \cos(n2\pi ft) \quad (1-4)$$

式中， $T=1/f$  是脉冲周期； $A\tau/T$  是直流项； $n$  是谐波次数。

令  $x = n\pi\tau/T = n\pi\tau f$ ，则上式可表达为

$$u(t) = \frac{A\tau}{T} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2A\tau}{T} \frac{\sin(x)}{x} \cos\left(\frac{2t}{\tau}x\right) \quad (1-5)$$

该式包含了周期脉冲信号频域分解后的各项频率分量。除直流项外，还包括一个基本频率（以下简称基频）和与基频频率成整数倍关系的谐波频率（以下简称谐波）。以  $x$  作为横轴，以归一化幅度  $a_n/a_0$  为纵轴，可以画出以  $\sin(x)/x$  为包络的不同频率分量振幅随频率分布的状况，称为信号频谱图。频谱图常用于描述信号的频域特性。图 1-5a、b 分别示出了周期正弦信号和周期脉冲信号的频谱图。

### 1.2.3 信号的带宽

由信号频谱图可以观察到一个信号所包含的频率成分。把一个信号所包含谐波的最高频

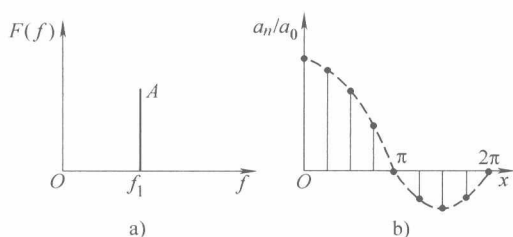


图 1-5 周期正弦信号和周期脉冲信号频谱图

a) 周期正弦信号 b) 周期脉冲信号

率  $f_h$  与最低频率  $f_l$  之差，即该信号所拥有的频率范围，定义为该信号的带宽。因此可以说，信号的频率变化范围越大，信号的带宽就越宽。在信号的典型应用中，周期矩形脉冲信号具有重要的代表意义，下面重点分析此类信号的频谱特点。

从图 1-5b 所示周期矩形脉冲信号的频谱可得出如下结论：

1) 周期矩形脉冲信号的频谱是离散的，频谱中有直流分量  $A\tau/T$ 、基频  $\Omega = 2\pi/T$  和  $n$  次谐波分量  $n\Omega$ ，谱线间隔为  $\Omega$ 。

2) 直流分量、基频及各次谐波分量的大小正比于  $A$  和  $\tau$ ，反比于周期  $T$ ，其变化受包络线  $\sin(x)/x$  的限制，有较长的拖尾（参见式 (1-5)）。

3) 当  $x \rightarrow \infty$ ，即  $f \rightarrow \infty$  时，谱线摆动于正负值之间并趋向于零。

4) 随着谐波次数的增加，幅度越来越小，理论上谐波次数可到无穷大，即该信号的带宽是无限的，但可以近似认为信号的绝大部分能量都集中在第一个过零点  $f = 1/\tau$  ( $x = \pi$ ) 左侧的频率范围内。这个频率范围外的信号频谱所占有的信号能量可以忽略不计。通常把第一个过零点左侧这段频率范围称为有效频谱宽度或信号的有效带宽，即

$$B = 1/\tau \quad (1-6)$$

该式表明，信号带宽与脉冲宽度成反比。即脉冲越窄，所占用的带宽越宽。带宽的概念对于理解通信系统的传输是非常重要的。

需要指出的是，信号带宽常与信道带宽相联系。信道带宽用于描述通信信道的特性，是表示通信传输容量的一个指标，信道带宽越大，其通过信号的能力越强，越能传输高质量的信号。

### 1.2.4 信号的衰耗与增益

信号在传输过程中会受到各种外界因素的影响，导致接收端信号与发送端信号相比发生变化。若输出端功率小于输入端功率，则称信号受到了衰耗。产生衰耗的主要原因是传输过程中存在阻抗，吸收了部分传输能量。若输出端功率大于输入端功率，则称信号受到了增益。信号经过信号放大器放大后就会产生增益。

衡量衰耗和增益大小的单位是分贝 (dB)，定义为

$$d = 10 \lg \left( \frac{P_{in}}{P_{out}} \right) \quad (1-7)$$

式中， $P_{in}$  和  $P_{out}$  分别是信号在输入、输出端两点的功率。

例如,把 10mW 功率的信号加到输入端并在输出端测得功率为 5mW,衰减  $d$  约为 3dB。式 (1-7) 也可用电压或电流表示。由功率  $P = V^2/R$  或  $P = I^2R$ , 得

$$d = 10\lg\left(\frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{out}}}\right) = 20\lg\left(\frac{V_{\text{in}}}{V_{\text{out}}}\right) = 20\lg\left(\frac{I_{\text{in}}}{I_{\text{out}}}\right) \quad (1-8)$$

在通信系统中,若讲到某点信号的强弱,经常使用电平的概念。正如我们把海平面作为衡量山高的参考点一样,电平是一个相对的概念。系统中某点的功率电平定义为该点信号的功率与一个称为基准参考点(阻抗是  $600\Omega$ , 基准功率值 1mW, 基准电压值 0.775V, 基准电流值 1.29mA) 的功率之比。具体来说,设  $P_x$  是点  $x$  处的信号功率,该点的电平定义为(用 dB 作单位)

$$D_x = 10\lg\left(\frac{P_x}{1\text{mW}}\right) = 20\lg\left(\frac{V_x}{0.775\text{V}}\right) = 20\lg\left(\frac{I_x}{1.29\text{mA}}\right) \quad (1-9)$$

使用电平最大的好处是计算上的方便,可以简化通信测量中对信号和噪声大小的计算。另外需要指出的是,当以上式表示系统中某点的电平时,习惯上使用 dBm 这个单位,1mW 的功率电平为 0dBm,称为绝对功率电平。

### 1.2.5 噪声与失真

叠加在有用信号之上并对信号的正常处理和传输产生有害影响的成分称为噪声。噪声的来源可能有两个:一个是外部干扰,如雷暴、天电、高压火花产生的电磁辐射等;另一个可能是系统内部固有的,如热噪声或自激噪声等。

信噪比常用于衡量一个通信系统的优劣,系统中某点的信噪比定义为该点的信号功率  $P_s$  与噪声功率  $P_N$  之比并取对数。一般来说,信噪比(dB)越大,通信质量越高。具体定义为

$$\text{SNR} = 10\lg\left(\frac{P_s}{P_N}\right) \quad (1-10)$$

在模拟通信系统中,噪声对有用信号的影响会随着传输距离的增加而产生累积效应,难以把有用信号从中提取出来,因而要求系统有较高的信噪比。但在数字通信系统中,以适当距离中继再生后就可以完全恢复出原始信号,这也是数字通信能够完全取代模拟通信的最根本的原因。图 1-6 显示了噪声叠加干扰导致信号幅度发生改变的情况。

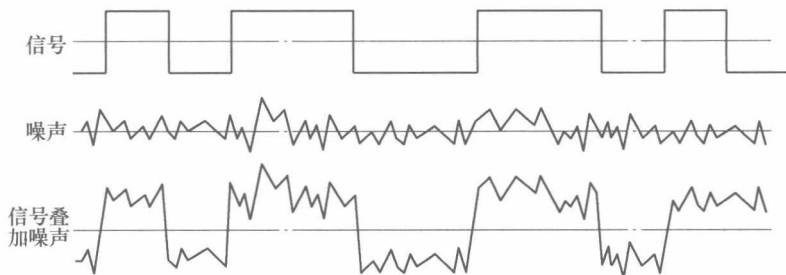


图 1-6 噪声叠加干扰导致信号幅度的变化

经过传输后的信号,由于受到通信系统本身条件限制可能会发生畸变,称为信号失真。所谓无失真传输,必须满足两个条件:一是系统对信号不同频率的幅度值产生等值的衰减或

放大；二是系统对信号不同频率具有常数群时延特性，即相位延迟与频率成正比。不满足第一个条件而导致的失真称为幅频失真。如果一个系统对不同频率分量产生不同的衰耗或放大，那么当信号通过该系统之后，各频率分量的幅度比例就会发生改变，叠加后将不能真实反应原信号。不满足第二个条件而导致的失真称为相频失真。如果一个系统对不同频率分量产生不同的相移（表现在时域就是产生不同的延迟），则系统输出的各频率分量叠加之后也不能真实反应原信号，这样产生的失真即为相频失真。这两种失真，仅仅是各次谐波的幅度、相位产生了变化，系统并未产生新的谐波频率，所以称为线性失真。可以通过改善系统的传输特性，降低线性失真，使其在工作频率内近似满足无失真传输条件。

某些情况下，由于传输系统的非线性特性，会导致接收到的信号产生新的频率分量，称之为非线性失真。非线性失真的种类繁多，如总谐波失真、交叉调制失真、互调制失真等，但其本质都是由通信系统的非线性影响所致。

### 1.3 通信系统的模型与指标

通信的目的是传送消息。消息可以表现为语音、图像、文字等多种形式，例如：电视台通过卫星可以把电视画面传送到千家万户；电话用户通过交换机可以实现拨号通话；网络用户通过互联网可以进行即时聊天等。一个通信系统应该具备一些最基本的功能特征来实现消息的传送，我们把这些最基本的功能特征总结抽象出来，就可以得到通信系统的一般模型。

#### 1.3.1 通信系统的一般模型

在任何通信系统中，发送消息的一端称为信源，接收消息的一端称为信宿。信源和信宿之间的传输路径称为信道。信源发出的消息先要经发送设备变换成适合于信道传输的信号形式，再经信道传输后由接收设备做出反变换恢复出信源消息，最后被信宿接收。而消息在传送过程中的任何一点都有可能受到噪声的干扰。据此，我们可以得到图 1-7 所示的通信系统一般模型。由于多数通信系统都具有双向通信的功能，即通信一方既是信源又是信宿，所以图中展示的是一个双向通信系统模型。

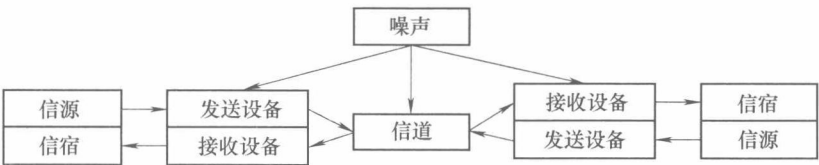


图 1-7 通信系统的一般模型

信源和信宿通常是能够对应把消息解读出来的设备或人。例如，电视机、接听电话的人或计算机终端等都可以作为信源或信宿。消息的形式可以是图像、语音，也可以是文字、符号等。

发送设备主要用于对信源消息进行物理格式变换。这样的物理格式变换可以是码型调整变换或者是频率调整变换，以适应信道对所传输信号格式的要求。接收端则利用接收设备做出反变换。

狭义的信道是指具有不同物理性质的各种传输媒介，如电缆、光缆、无线大气空间等。