

21世纪高等院校优秀教材

# 通信原理与应用

主 编 韩天石 黄琦志  
编 著 蔡 勇 李远星 杨 霞 孙 勇 何志刚  
主 审 李曙东

国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

21 世纪高等院校优秀教材

# 通信原理与应用

主编 韩天石 黄琦志

编著 蔡勇 李远星 杨霞 孙勇 何志刚

主审 李曙东

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书以现代通信系统为背景,着重介绍了现代通信技术的基本原理以及在军事领域中的应用。现代通信技术的基本原理包括模拟通信和数字通信,侧重于数字通信。

全书共9章,内容包括通信系统基本概念、信号与噪声、模拟调制、模拟信号的波形编码、数字信号传输、无线通信技术应用、战场数据分发系统应用、数据链路技术与应用和通信系统发展趋势等。

本书内容简炼、概念清晰、理论联系实际,充分体现了近年来通信技术的一些最新发展成果和理论。

本书可作为高等院校通信工程专业和信息电子类相关专业的本科生教材,也可作为相关领域的工程技术人员和科研人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

通信原理与应用 / 韩天石, 黄琦志主编. —北京: 国防工业出版社, 2005.3  
ISBN 7-118-03825-3

I. 通... II. ①韩...②黄... III. 通信理论  
IV. TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 012524 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经营

\*

开本 787×1092 1/16 印张 19 1/4 450 千字

2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月北京第 1 次印刷

印数: 1—4000 册 定价: 30.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

# 前 言

现代社会已经进入了信息时代,信息技术日益改变着我们的生活。作为信息技术的基础——通信技术,也走入了人们的日常生活。

现代通信技术的发展日新月异,而且正在迅速地向各个领域渗透。特别是通信技术与计算机技术的结合,正在以前所未有的力度促进通信网络、计算机网络和综合业务网络的发展。所以信息专业的学生不管是从为自己的专业打下良好基础的角度,还是从更好地适应现代信息社会生活、把握时代脉搏的角度出发,都要全面学习通信技术的基本概念和基本原理,掌握通信技术的最新发展趋势。

为了让读者建立对通信技术和通信网络的整体概念,从通信技术角度对其基本概念、基本原理有深入的理解和掌握,我们编写了这本试图尽可能全面地介绍现代通信技术的教材。本书以当前广泛应用的通信系统和代表发展趋势的通信新技术为背景,从读者认知规律出发,首先让读者建立起一个通信技术体系框架的概念,然后通过学习基本的技术原理,达到对整个通信网络和各种通信技术的基本掌握。本书在介绍传统技术基本原理的基础上,刻意于取材的新颖和先进,力求充分反映近年来国内外通信技术的发展。

全书共分为9章。第1章绪论,初步介绍通信和通信系统的基本概念,主要传输手段的发展现状和趋势。第2章信号与噪声,对于未学过“信号与系统”和“随机过程”这两门课程的读者,可通过该章的内容了解有关的概念和结论,也是对本书所涉及到的部分基础知识作一说明。第3章模拟调制,为模拟通信部分,包括模拟调制的分类、原理及方法,抗噪声性能的分析模型及方法。第4章、第5章为数字通信部分。第4章的内容为模拟信号的波形编码,以广泛应用的脉冲编码调制为主,分析从模拟信号转化为数字信号的过程。第5章讨论数字信号的基带传输和载波传输以及差错控制编码。基带传输包括传输方式、基带系统传输错误率的分析和计算;载波传输包括各种调制方法,例如多进制调制数字调制方法;差错控制编码包括差错控制的基本概念、线性分组码的编译码方法及纠错性能。第6章无线通信技术应用,主要介绍了无线电台通信、卫星通信和移动通信的分类、特点、组成及具体应用。第7章战场数据分发系统应用,主要介绍了系统组成、工作特性、应用情况,并详细说明了联合战术信息分发系统和定位报告系统/增强型定位报告系统。第8章数据链路技术与应用,包括数据链路性能及用途、数据链路的操作方式和数据链路的互连。第9章通信系统发展趋势,包括未来战术通信系统的信息结构、特征和作用,未来战场数字化通信,战术环境中的多媒体通信以及未来战术通信与信息战。

感谢李曙东教授对本书的审阅。对本书所列文献作者,在此一并致谢。

鉴于编著者水平有限,难免有不妥之处,欢迎读者指正。

编著者

# 目 录

|                    |    |
|--------------------|----|
| 第 1 章 绪论           | 1  |
| 1.1 概述             | 1  |
| 1.2 模拟通信与数字通信      | 1  |
| 1.3 通信发展简史         | 3  |
| 1.4 通信系统的质量指标      | 3  |
| 1.4.1 模拟通信系统的质量指标  | 4  |
| 1.4.2 数字通信系统的质量指标  | 4  |
| 1.5 主要传输手段的发展现状和趋势 | 5  |
| 第 2 章 信号与噪声        | 8  |
| 2.1 信号和系统的分类       | 8  |
| 2.1.1 信号的分类        | 8  |
| 2.1.2 系统的分类        | 9  |
| 2.2 确定信号的分析        | 9  |
| 2.2.1 周期信号         | 9  |
| 2.2.2 信号的傅里叶变换     | 10 |
| 2.2.3 信号的能量谱与功率谱   | 13 |
| 2.2.4 波形的互相关和自相关   | 15 |
| 2.3 随机信号的分析        | 19 |
| 2.3.1 概率及随机变量      | 19 |
| 2.3.2 随机过程和它的统计特性  | 24 |
| 2.3.3 平稳随机过程       | 26 |
| 2.3.4 高斯随机过程       | 29 |
| 2.3.5 平稳随机过程通过线性系统 | 32 |
| 2.3.6 窄带随机过程       | 35 |
| 2.4 信道与噪声          | 39 |
| 2.4.1 信道的定义和模型     | 39 |
| 2.4.2 高斯白噪声        | 41 |
| 2.5 信息及其度量         | 42 |
| 2.5.1 信息量          | 43 |
| 2.5.2 平均信息量        | 44 |
| 第 3 章 模拟调制         | 46 |
| 3.1 线性调幅           | 46 |

|            |                    |           |
|------------|--------------------|-----------|
| 3.1.1      | 常规调幅(AM)           | 46        |
| 3.1.2      | 抑制载波双边带调幅(DSB-SC)  | 49        |
| 3.1.3      | 调制与解调              | 50        |
| 3.1.4      | 单边带调制(SSB)         | 54        |
| 3.1.5      | 残留边带调制(VSB)        | 57        |
| 3.1.6      | 通信系统抗噪声性能的分析模型     | 59        |
| 3.2        | 模拟角调制              | 61        |
| 3.2.1      | 角调制基本概念            | 61        |
| 3.2.2      | 窄带角调制              | 63        |
| 3.2.3      | 正弦信号调制时的宽带调频       | 65        |
| 3.2.4      | 宽带调相               | 69        |
| 3.3        | 频分多路复用             | 70        |
| 3.4        | 时分复用(TDM)          | 71        |
| <b>第4章</b> | <b>模拟信号的波形编码</b>   | <b>74</b> |
| 4.1        | 脉冲编码调制(PCM)        | 74        |
| 4.1.1      | 脉冲编码调制的基本原理        | 74        |
| 4.1.2      | 抽样定理               | 75        |
| 4.1.3      | 量化                 | 81        |
| 4.1.4      | 均匀量化和线性PCM编码       | 83        |
| 4.1.5      | 非均匀量化              | 85        |
| 4.1.6      | 对数量化及其折线近似         | 86        |
| 4.1.7      | A律PCM编码原理          | 89        |
| 4.2        | 差分脉码调制(DPCM)       | 92        |
| 4.3        | 增量调制( $\Delta M$ ) | 93        |
| 4.3.1      | 简单增量调制             | 94        |
| 4.3.2      | 自适应增量调制            | 95        |
| <b>第5章</b> | <b>数字信号传输</b>      | <b>97</b> |
| 5.1        | 数字信号的基带传输          | 97        |
| 5.1.1      | 数字基带信号的常用码型        | 97        |
| 5.1.2      | 数字基带信号的功率谱         | 103       |
| 5.1.3      | 波形传输的无失真条件         | 108       |
| 5.1.4      | 扰码与解扰              | 113       |
| 5.2        | 数字信号的载波传输          | 119       |
| 5.2.1      | 二进制数字调制            | 119       |
| 5.2.2      | 数字信号的最佳接收          | 129       |
| 5.2.3      | 多进制数字调制            | 138       |
| 5.3        | 差错控制编码             | 144       |
| 5.3.1      | 差错控制编码的基本概念        | 144       |
| 5.3.2      | 线性分组码              | 151       |

|              |                           |            |
|--------------|---------------------------|------------|
| 5.3.3        | 循环码 .....                 | 152        |
| 5.3.4        | 纠错码的误码性能 .....            | 154        |
| <b>第 6 章</b> | <b>无线通信技术应用 .....</b>     | <b>157</b> |
| 6.1          | 无线电台通信 .....              | 157        |
| 6.1.1        | 无线电台的分类 .....             | 157        |
| 6.1.2        | 无线电台的发展历史与现状 .....        | 158        |
| 6.1.3        | 无线电台的发展趋势 .....           | 159        |
| 6.1.4        | 无线电台在未来战争中的地位与作用 .....    | 162        |
| 6.1.5        | 无线电台的新技术 .....            | 164        |
| 6.1.6        | 战术无线电台组网原理 .....          | 175        |
| 6.1.7        | 美军战术无线电台 .....            | 184        |
| 6.1.8        | 其他外军战术无线电台 .....          | 188        |
| 6.2          | 卫星通信 .....                | 194        |
| 6.2.1        | 卫星通信的基本概念 .....           | 194        |
| 6.2.2        | 军事卫星通信的地位与作用 .....        | 195        |
| 6.2.3        | 军事卫星通信的特点 .....           | 195        |
| 6.2.4        | 军事通信卫星的频段划分 .....         | 196        |
| 6.2.5        | 卫星通信系统的组成 .....           | 196        |
| 6.2.6        | 军事卫星通信系统在现代战场的应用 .....    | 198        |
| 6.2.7        | 高技术局部战争中的军事卫星通信体系结构 ..... | 201        |
| 6.2.8        | 军事通信卫星的发展趋势 .....         | 205        |
| 6.2.9        | 军事通信卫星系统应用举例 .....        | 208        |
| 6.3          | 移动通信 .....                | 211        |
| 6.3.1        | 移动通信的发展过程 .....           | 212        |
| 6.3.2        | 移动通信特点 .....              | 213        |
| 6.3.3        | 移动通信系统组成 .....            | 214        |
| 6.3.4        | 移动通信工作频段 .....            | 217        |
| 6.3.5        | 移动通信组网方式 .....            | 218        |
| <b>第 7 章</b> | <b>战场数据分发系统应用 .....</b>   | <b>233</b> |
| 7.1          | 战场数据分发系统的由来 .....         | 233        |
| 7.2          | 系统组成 .....                | 233        |
| 7.3          | 系统工作特性 .....              | 234        |
| 7.4          | 联合战术信息分发系统 .....          | 234        |
| 7.4.1        | 联合战术信息分发系统的基本工作方式 .....   | 234        |
| 7.4.2        | 联合战术信息分发系统传送的消息 .....     | 237        |
| 7.4.3        | 联合战术信息分发系统信号特征 .....      | 240        |
| 7.5          | 定位报告系统/增强型定位报告系统 .....    | 241        |
| 7.5.1        | 定位报告系统 .....              | 241        |
| 7.5.2        | 增强型定位报告系统 .....           | 244        |

|            |                           |            |
|------------|---------------------------|------------|
| 7.5.3      | 定位报告系统干扰 .....            | 246        |
| 7.5.4      | 增强型定位报告的保密性 .....         | 246        |
| 7.6        | 战场数字分发系统的应用 .....         | 248        |
| 7.6.1      | 基本要求 .....                | 248        |
| 7.6.2      | 联合战术信息分发系统的战场应用 .....     | 248        |
| 7.6.3      | 定位报告系统的战场应用 .....         | 249        |
| 7.6.4      | 增强型定位报告系统的战场应用 .....      | 250        |
| 7.6.5      | 发展趋势与特点 .....             | 251        |
| <b>第8章</b> | <b>数据链路技术与应用</b> .....    | <b>252</b> |
| 8.1        | 数据链路 .....                | 252        |
| 8.2        | 数据链路性能及用途 .....           | 253        |
| 8.3        | 数据链路构成 .....              | 256        |
| 8.4        | 数据链路的操作方式 .....           | 257        |
| 8.5        | Link10 操作 .....           | 260        |
| 8.6        | Link11 操作 .....           | 262        |
| 8.7        | 数据链路的互连 .....             | 264        |
| 8.7.1      | 同类数据链路的互联 .....           | 264        |
| 8.7.2      | 不同类数据链路的互联 .....          | 265        |
| 8.7.3      | 数据链路与 X2.5 网的互联 .....     | 266        |
| 8.8        | 数据链路的发展趋势 .....           | 267        |
| <b>第9章</b> | <b>通信系统发展趋势</b> .....     | <b>268</b> |
| 9.1        | 未来战术通信系统的信息结构、特征和作用 ..... | 268        |
| 9.1.1      | 未来战术通信系统信息结构 .....        | 268        |
| 9.1.2      | 未来战术通信系统的基本功能 .....       | 269        |
| 9.1.3      | 未来战术通信系统的实现目标 .....       | 271        |
| 9.2        | 未来战场数字化通信 .....           | 272        |
| 9.2.1      | 战场数字化通信的含义 .....          | 273        |
| 9.2.2      | 战场数字化通信的作用 .....          | 273        |
| 9.2.3      | 战场数字化通信技术 .....           | 274        |
| 9.2.4      | 战场数字化通信组网 .....           | 280        |
| 9.2.5      | 21 世纪士兵系统 .....           | 284        |
| 9.3        | 战术环境中的多媒体通信 .....         | 286        |
| 9.3.1      | 多媒体通信系统构成 .....           | 287        |
| 9.3.2      | 多媒体通信网络结构 .....           | 288        |
| 9.3.3      | 多媒体通信网络模拟 .....           | 290        |
| 9.3.4      | 战场环境中多媒体通信协议 .....        | 291        |
| 9.3.5      | 多媒体通信的战术应用 .....          | 293        |
| 9.4        | 未来战术通信与信息战 .....          | 293        |
| 9.4.1      | 制电磁频谱权的作用 .....           | 294        |

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 9.4.2 信息武器攻击的潜在危险 ..... | 295 |
| 9.4.3 信息武器驾驭战争的优势 ..... | 296 |
| 9.4.4 信息战的防御措施 .....    | 297 |
| 附录1 常用三角函数公式 .....      | 299 |
| 附录2 $Q$ 函数表和误差函数表 ..... | 300 |
| 附录3 第一类贝塞尔函数表 .....     | 303 |
| 参考文献 .....              | 304 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 概 述

人类社会建立在信息交流的基础上,通信是推动人类社会文明进步与发展的巨大动力。按照人类通信交流方式与技术的不同,可以把历史划分为 5 个阶段。第 1 阶段的通信方式是语言,人们通过人力、马力以及烽火台等原始手段传递信息。第 2 阶段从发明文字以及邮政通信开始。第 3 阶段以发明印刷术为标志。第 4 阶段从电报、电话和广播的发明开始,从此人们进入了电器通信时代,通信技术得到了迅速的发展。第 5 阶段为信息时代,随着现代科学技术和现代经济的发展,社会对信息传递、储存和处理的要求愈来愈高,信源的种类愈来愈多,不仅有语言,还包括数据,图像和文本等。现代通信在这第 5 阶段,通信和计算机已经而且必将有机地结合起来。

现代通信系统是信息时代的生命线。现代通信网络已不再是单一的电话网络或电报文字通信网络,而是一个综合性的为多种信息服务的通信网络。为适应世界性的政治与经济活动的需要,人类已经迅速建立起世界性的全球通信网络。目前,这个现代通信网络连接有 6 亿部以上的电话,还提供了大量的用户电报以及数据通信业务,现代通信已成为最重要的信息技术服务。目前,许多发达国家的通信收入已超过铁路交通部门。当前,能源、汽车、钢铁、通信与农业是世界五大行业。

现代通信与经济的发展密切相关,通信网络已经成为支撑现代经济的最重要的基础结构之一。可以说,没有现代通信就没有经济的高速发展。宏观经济研究认为,信息与生产效率和经济增长之间成正比关系。一些经济高速发展的国家和地区的统计数字表明,通信建设的增长必须赶上甚至超出国民经济总产值的增长,才有经济的高速发展。改革开放以来,我国的通信建设有了迅速的发展,但与一些发达国家相比还很落后。由此可见,现代通信系统的建设与发展是实现现代化的一项重要而又艰巨的任务。

## 1.2 模拟通信与数字通信

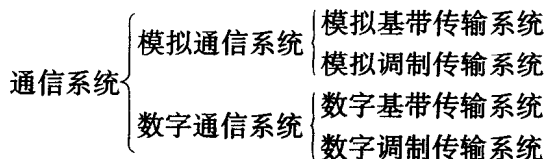
通信系统有待传输的消息形式是多种多样的,它可以是符号、文字、语音或图像等。为了实现消息的传输和交换,首先需要把消息转换为相应的电信号(以下简称信号)。通常,这些信号是以它的某个参量的变化来表示消息的。按照信号参量的取值方式不同可将信号分为 2 类,即模拟信号与数字信号。模拟信号的某个参量与消息相对应而连续取值,例如电话机话筒输出的语音信号、电视摄像机输出的电视图像信号等都属于模拟信号。数字信号的参量是离散取值的,例如计算机、电传机输出的信号就是数字信号。

这样,根据通信系统所传输的是模拟信号还是数字信号,可以相应地把通信系统分成

模拟通信系统与数字通信系统。也就是说,信道中传输模拟信号的系统称为模拟通信系统,信道中传输数字信号的系统称为数字通信系统。当然,以上的分类方法是以信道传输信号的差异为标准的,而不是根据信源输出的信号来划分的。如果在发送端先把模拟信号转换成数字信号,即进行 A/D 变换,然后就可利用数字方式进行传输,在接收端再进行相反的变换——D/A 变换,以还原出模拟信号。

模拟信号和数字信号通常都要经过调制形成模拟调制信号和数字调制信号,以适应信道的传输特性。在短距离的有线传输场合,也使用基带传输的方式。

综合以上情况,通信系统的分类可表示为



模拟通信系统的框图如图 1-1 所示。图 1-1 就是一个最简化的模拟通信系统的模型。

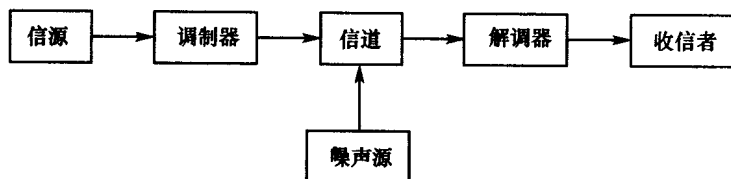


图 1-1 模拟通信系统模型

数字通信系统模型如图 1-2 所示。包括信源编码、信道编码和调制 3 个部分。信源编码是对模拟信号进行编码,得到相应的数字信号;信道编码是对数字信号进行再次编码,使之具有自动检错和纠错的能力。数字信号对载波进行调制形成数字调制信号。高质量的数字通信系统才有信道编码部分。

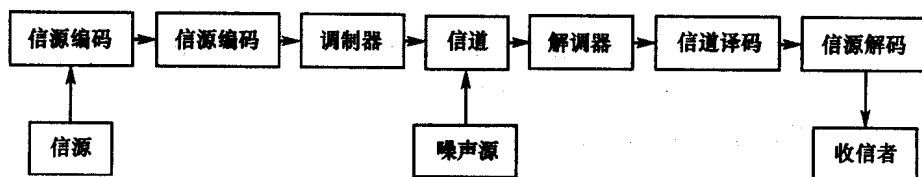


图 1-2 数字通信系统模型

图 1-1 和图 1-2 所表示的均为单向通信系统,但在绝大多数场合,通信的双方互通信息,因而要求双向通信。单向通信称为单工方式,双向通信称为双工方式。

就目前来说,不论是模拟通信还是数字通信,在通信业务中都得到了广泛应用。但是,近 20 年来,数字通信发展十分迅速,在整个通信领域中所占比重日益增长,在大多数通信系统中已替代模拟通信,成为当代通信系统的主流。这是因为与模拟通信相比,数字通信更能适应对通信技术越来越高的要求。数字通信的主要优点如下。

(1) 抗干扰能力强。在远距离传输中,各中继站可以对数字信号波形进行整形再生

而消除噪声的积累。此外,还可以采用各种差错控制编码方法进一步改善传输质量。

(2) 便于加密,有利于实现保密通信。

(3) 易于实现集成化,使通信设备的体积小、功耗低。

(4) 数字信号便于处理、存储、交换,便于和计算机连接,也便于用计算机进行管理。

当然,数字通信的许多优点都是用比模拟通信占据更宽的频带而换得的。以电话为例,一路模拟电话通常只占据 4kHz 带宽,但一路数字电话却要占据 20kHz~60kHz 的带宽。随着社会生产力的发展,有待传输的数据量急剧增加,传输可靠性和保密性的要求越来越高,在实际工程中宁可牺牲系统频带也要采用数字通信。至于在频带富裕的场合,比如毫米波通信、光通信等,当然都惟一地选择数字通信。

### 1.3 通信发展简史

电通信的历史并不长,至今不过只有 160 年的时间。一般把 1838 年有线电报的发明作为开始使用电通信的标志,但那时的通信距离只有 70km。1876 年发明的有线电话被称为是现代电通信的开端。1878 年世界上的第一个人工交换局只有 21 个用户。无线电报于 1896 年实现,它开创了无线电通信发展的道路。1906 年电子管的发明迅速提高了无线通信及有线通信的水平。

伴随着通信技术的发展,通信科学早在 20 世纪 30 年代起就获得了突破性的进展,先后形成了脉冲编码原理、信息论、通信统计理论等重要理论体系。50 年代以后,由于晶体管和集成电路的问世,不仅模拟通信获得了高速发展,而且促成了具有广阔前景的数字通信方式的形成。在通信种类上,相继出现了脉码通信、微波通信、卫星通信、光纤通信、计算机通信等。计算机和通信技术的密切结合,使通信的对象突破了人与人之间的范畴,实现了人与机器或机器与机器之间的通信。

80 年代以后,除了传统的电话网、电报网以外,各种先进的通信网络蓬勃发展,例如移动通信网、综合业务数字网、公用数据网、智能网、宽带交换网等。先进的通信网络使通信不断地朝着综合化、宽带化、自动化和智能化的方向发展。为人类提供方便快捷的服务,是通信技术追求的目标。

### 1.4 通信系统的质量指标

为了衡量通信系统的质量优劣,必须使用通信系统的性能指标,即质量指标。这些指标是为整个系统进行综合评估而规定的。通信系统的性能指标是一个十分复杂的问题,涉及到通信的有效性、可靠性、适应性、标准性、经济性及维护使用等。但是,从研究信息的传输来说,通信的有效性和可靠性是最重要的指标。有效性指的是传输一定的信息量所消耗的信道资源数(带宽或时间),而可靠性指的是接收信息的准确程度。这 2 项指标体现了通信系统最基本的要求。

有效性和可靠性这 2 个要求通常是矛盾的,因此只能根据及技术发展水平尽可能取得适当的统一。例如在一定可靠性指标下,尽量提高消息的传输速度;或者在一定有

效性条件下,使消息的传输质量尽可能高。

模拟通信和数字通信对这两个指标要求的具体内容有很大差别,必须分别加以说明。

### 1.4.1 模拟通信系统的质量指标

#### 1. 有效性

模拟通信系统的有效性用有效传输带宽来度量。同样的消息采用不同的调制方式,则需要不同的频带宽度。频带宽度越窄,则有效性越好。如传输一路模拟电话,单边带信号只需要 4kHz 带宽,而常规调幅或双边带信号则需要 8kHz 带宽,因此在一定频带内用单边带信号传输的路数比常规调幅信号多一倍,也就是说可以传输更多的消息。显然,单边带系统的有效性比常规调幅系统要好。

#### 2. 可靠性

模拟通信系统的可靠性用接收端最终的输出信噪比来度量。信噪比越大,通信质量越高。如普通电话要求信噪比在 20dB 以上,电视图像则要求信噪比在 40dB 以上。信噪比是由信号功率和传输中引入的噪声功率决定的。不同调制方式在同样信道条件下所得到的输出信噪比是不同的。例如调频信号的抗干扰性能比调幅信号好,但调频信号所需的传输带宽却宽于调幅信号。

### 1.4.2 数字通信系统的质量指标

数字通信系统的有效性用传输速率来衡量,可靠性用差错率来衡量。

#### 1. 传输速率

数字信号由码元组成,码元携带有一定的信息量。定义单位时间传输的码元数为码元速率  $R_s$ ,单位为码元/s,又称波特(baud),简称为 Bd,所以码元速率也称波特率。定义单位时间传输的信息量为信息速率  $R_b$ ,单位为 bit/s(比特/秒),所以信息速率又称为比特率。一个二进制码元的信息量为 1 bit,一个  $M$  进制码元的信息量为  $\log_2 M$  bit,所以码元速率  $R_s$  和信息速率  $R_b$  之间的关系为

$$R_b = R_s \log_2 M (\text{bit/s}) \quad (1-1)$$

$$R_s = \frac{R_b}{\log_2 M} (\text{baud}) \quad (1-2)$$

如每秒钟传送 2400 个码元,则码元速率为 2400baud;当采用二进制时,信息速率为 2400bit/s;当采用四进制时,信息速率为 4800bit/s。

二进制的码元速率和信息速率在数量上相等,有时简称它们为数码率。

数字信号的传输带宽  $B$  取决于码元速率  $R_s$ ,而码元速率和信息速率  $R_b$  有着确定的关系。为了比较不同系统的传输效率,定义频带利用率为

$$\eta_b = \frac{R_b}{B} \quad (1-3)$$

其物理意义为单位频带能传输的信息速率,单位为 bit/(s·Hz)。

#### 2. 差错率

定义误比特率  $P_b$  为

$$P_b = \frac{\text{错误比特数}}{\text{传输总比特数}} \quad (1-4)$$

定义误码元率  $P_s$  为

$$P_s = \frac{\text{错误码元数}}{\text{传输的总码元数}} \quad (1-5)$$

有时将误比特率称为误信率,误码元率称为误符号率,也称为误码率。

在二进制码中,有

$$P_b = P_s$$

这时误信率和误码率相同。

差错率越小,通信的可靠性越高。对  $P_b$  要求与所传输的信号有关,如传输数字电话信号时,要求  $P_b$  在  $10^{-3} \sim 10^{-6}$ ,而传输计算机数据则要求  $P_b < 10^{-9}$ 。当信道不能满足要求时,必须加以纠错。

## 1.5 主要传输手段的发展现状和趋势

### 1. 电缆通信

电缆通信是最早发展起来的通信手段,用于长途通信已有 60 余年,在通信中占有重要地位。在光纤通信和移动通信发展之前,电话、传真、电报等各用户终端与交换机的连接全靠市话电缆。电缆还曾是长途通信和国际通信的主要手段,大西洋、太平洋均有大容量的越洋电缆。根据 1982 年的统计,我国公用网长途线路总长为 18 余万千米,其中 90% 为明线。目前,同轴电缆所占的比例已上升到 1/3 左右。电缆通信中主要采用模拟单边带调制和频分多路复用(SSB/FDM)。国际上同轴电缆每芯最高容量达 13200 路(或 6 路广播电视),我国沪-杭、京-汉-广同轴电缆干线可通过 1800 路载波电话。自从数字电话问世以来,各国大力发展脉冲编码调制时分多路信号在同轴电缆中的基带传输技术,数字电话容量可达 4032 路。近年来,由于光纤通信的发展,同轴电缆有逐渐被光缆取代的趋势。

### 2. 微波中继通信

微波通信是 20 世纪 60 年代开始发展的,它弥补了电缆通信的缺点,可到达电缆无法敷设的地区,且容易架设,建设周期短,投资也低于同轴电缆。微波通信是美、俄、日等国内长途电话和电视节目的主要传输手段。美国现有数十万千米的微波中继线路,俄罗斯最长的一条微波中继通信线路长达 1 万多千米,直通东欧。目前模拟电话微波通信容量每频道可达 6000 路,主要采用 SSB/FM/FDM 调制方式。

随着数字通信的发展,数字微波成为微波中继通信的主要发展方向。早期的数字微波大都采用 BPSK、QPSK 调制,为了提高频谱利用率,增加容量,现已向多电平调制技术发展,采用了 16QAM 和 64QAM 调制,并已出现 256QAM、1024QAM 等超多电平调制的数字微波。采用多电平调制,在 40MHz 的标准频道间隔内可传送 1920 路~7680 路脉冲编码调制数字电话,赶上并超过模拟微波通信容量。

我国现有 5 万多千米微波中继通信线路,其中 3/5 用于通信,2/5 用于广播电视节目

传送。尽管微波通信面临光纤通信的严重挑战,但仍将是长途通信的一个重要传输手段。

### 3. 光纤通信

光纤通信具有容量大、成本低的优点,而且不怕电磁干扰,与同轴电缆相比可以大量节约有色金属和能源。因此,自1977年世界上第一个光纤通信系统在芝加哥投入运行以来,光纤通信发展极为迅速,新器件、新工艺、新技术不断涌现,性能日臻完善。世界各国广泛采用光纤通信,大西洋、太平洋的海底光缆通信系统已经开通使用,其容量超出原有的海底电缆通信系统。由于长波长激光器和单模光纤的出现,每芯光纤通话路数可望达到百万路,中继距离将超过100万千米,市话中继光纤通信系统的成本也将大幅度下降。目前,某些工业发达国家长途及市话中继系统光纤通信网络的建设已基本完成,今后将集中发展用户光纤通信网络。

迄今为止我国光纤通信系统累计光缆长度已达上万千米。目前除了扩充改造原有同轴电缆载波线路,充分发挥其作用外,已不再敷设同轴电缆,全部采用光纤通信新技术。预计未来十几年内光缆将增加到10万千米。

光纤通信的主要发展方向是单模长波长光纤通信,大容量数字传输技术和相干光通信。

### 4. 卫星通信

卫星通信的特点是通信距离远、覆盖面积大、不受地形条件限制、传输容量大、建设周期短、可靠性高。自1956年第一颗国际通信卫星投入商用以来,卫星通信得到迅速发展,现在第六代国际通信卫星即将投入使用。目前,卫星通信的使用范围已遍及全球,仅国际卫星通信组织就拥有数十万条话路,80%的洲际通信业务和100%的远距离电视传输业务均采用卫星通信,卫星通信已成为国际通信的主要传输手段。同时,卫星通信已进入国内通信领域,许多发达国家和发展中国家已拥有国内通信卫星系统。

20世纪70年代以来,我国开始将卫星通信用于国际通信,自1985年开始发展国内卫星通信,至今已发射多颗同步卫星,连同租借的国际卫星的转发器,已拥有22个转发器。与182个国家和地区开通了国际通信业务,并初步组织了国内公用卫星通信网及若干专用网。

卫星通信中,目前大量使用的是模拟调制及频分多路和频分多址。如同其他通信方式一样,其发展方向也是数字调制,时分多路和时分多址。卫星通信正向更高频段发展,采用多波束卫星和星上处理等新技术,地面系统的主要趋势是小型化。近年来蓬勃发展的VSAT(甚小口径终端)小站技术集中反映了调制/解调、纠错编码/译码、数字信号处理、通信专用超大规模集成电路、固态功放和低噪声接收、小口径低旁瓣等多项新技术的进步。

### 5. 移动通信

移动通信是现代通信中发展最为迅速的一种通信手段,它是随着汽车、飞机、轮船、火车等交通工具的发展而同步发展起来的。近10年来,在微波电子技术和计算机技术的推动下,移动通信从过去简单的无线电对讲或广播方式发展成为一个有线、无线融为一体,固定、移动相互连通的全国规模的通信系统。在电信工业中,移动通信设备所占的比例已名列第三,仅次于电话、数据通信。目前,欧美各国蜂窝公用移动通信系统的用户已有数百万。我国公用移动通信正处于发展初期,专用移动通信及无线寻呼在近10年发展迅

速。

移动通信的发展方向是数字化、微型化和标准化。20世纪90年代将是蜂窝电话迅速普及的10年,但目前世界上存在8种不同的技术体制,互不兼容,因此标准化是当务之急。数字化的关键是调制方式、纠错编码和数字电话语音编码方式的确定。微型化的目标是研制重量仅数十克的可个人携带的移动电话。

## 第 2 章 信号与噪声

通信系统传输的是和原始消息相对应的电信号,因此通信系统的根本问题是研究信号在系统中的传输变换。

实际的信号通常是随机的,加之通信系统中普遍存在的噪声都是随机的,所以对随机信号的分析是非常重要的。随机信号的分析方法与确定信号的分析方法有很多共同之处,甚至有些时候随机信号也可以当作确定信号来分析,因此确定信号的分析方法是信号分析的基础。

### 2.1 信号和系统的分类

#### 2.1.1 信号的分类

由语音、图像、数码等形成的电信号,其形式可以是多种多样的,但根据其本身的特点,可作以下分类。

##### (1) 数字信号与模拟信号

根据电信号参量取值的不同,可分为模拟信号和数字信号(或称为离散信号和连续信号)。例如计算机、电传打字机输出的脉冲信号是数字信号,普通电话机输出的电话信号是模拟信号。

##### (2) 周期信号与非周期信号

周期信号是每隔固定的时间又重现本身的信号,固定的时间称为周期。非周期信号则是无此固定时间长度的信号。通信系统中常用于测试的正(余)弦信号、雷达中的矩形脉冲系列都是周期信号;而语音信号、开关启闭所造成的瞬态则是非周期信号。

##### (3) 确定信号与随机信号

可以用明确的数学表达式表示的信号称为确定信号。但有些信号在发生之前无法预知信号的取值,即写不出确定的数学表示式,通常只知道它取某一数值的概率,这种信号称为随机信号。

##### (4) 能量信号与功率信号

能量有限的信号称为能量信号,通常它是一个脉冲式的信号,只存在于有限的时间间隔内。在  $(-T/2, T/2)$  时间内信号在  $1\Omega$  电阻上消耗的能量是有限的,即

$$E = \int_{-T/2}^{T/2} |f(t)|^2 dt < \infty \quad (2-1)$$

而信号的平均功率为

$$S = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |f(t)|^2 dt \quad (2-2)$$