

数字通信理论与系统

第1章 绪论

1.1 信息化社会中的数字通信

- 人类已进入信息社会，信息化是人类社会发展的一次重大飞跃，这次飞跃主要得益于近年来电子信息技术突破性发展。

- ① 微电子技术的高度发展，使信息的高密度存储，复杂算法的低功耗实现成为可能。
- ② 计算机和信号处理技术的高速发展，使人类产生和处理信息的效率大幅度提高；
- ③ 光电子技术的发展，使信息能够通过光纤高速传输，并解决了图像和文字信息的低功耗显示，使人类获取和认知信息的效率大幅度提高。
- ④ 通信传输与网络技术的大发展，使进行信息交换和传播的方式发生了本质性的变化，人与人之间进行信息交换的效率得到极大的提高。

人类在信息的产生、获取、存储、处理、传输和交换等方面取得重大进步的同时，都伴随着信息的数字化，数字化是信息科学技术领域的一次重要革命。

- 数字化曾形成一股强盛的潮流

- ① 视觉信息的数字化：图像、文字和视频信息的数字表示，以及高质量显示和高效率的人机交互；
- ② 听觉信息的数字化：包括语音、音乐信息的数字化；还有其它感觉信息的数字化，包括地理信息、空间信息、其它各种物理量的数字化。
- ③ 各种信号的分析、表示、处理、自动识别、传输、存储的数字化，以及系统仿真技术的发展等，对信息化社会都起了重要推动作用。
- ④ 通信的数字化在数字化潮流中起到了引领作用，包括通信内容、信号处理方法、通信系统设备的数字化。它使人类的生产、生活、科学研究以及社会活动发生了前所未有的重大变化和巨大进步。因此数字化也是人类社会的一次重大变革。

- 数字化的通信在信息化社会中占有十分重要的地位，地球村的概念首先是通信现代化。信息就是财富，财富的高速增长需要信息的高速传输和高效获取。通信的发展正在改变人们的生活和生产方式，推动信息化社会向更加高级的阶段和更高的水平发展。

1.2 通信系统和通信信道

1.2.1 通信系统的基本结构

通信系统的基本结构：

发送端包括信源、信源编码、信道编码、调制等单元；接收端包括解调、信道译码、信源译码和信宿等单元；发送信号从发送端经过信道传输到接收端，这三部分一起构成通信系统。



图 1-1 通信系统的基本结构

通信系统各部分完成五个方面的信息处理：

1) 输入/输出信息的转换：发端将信息进行适当编排和数字化，接收端复原；这个过程常常伴随着人机交互，因此实现这些功能的部件一般称为用户终端设备。

2) 信源编码/译码：发端去除信息冗余以便提高通信的效率，收端恢复信源信息；

3) 信道编码/译码：传输时编为通信符号（码元）序列，按某种规则加入冗余以便提高通信的可靠性，收端进行纠错译码，恢复原发送信息；

4) 数字调制/解调：发端把数据流变成适于信道传输的信号波形进行传输，收端进行解调，将信号波形恢复为数据流。

5) 对抗信道失真的信号处理

当信道特性因存在失真而不是理想的加性高斯白噪声信道时，信道传输信息的性能将变坏，甚至完全失效。如果信道失真的特性是已知的，可以采用某种数学模型描述，那么常常可以找到相应的信号处理办法使其传输性能显著改善。

1.2.2 通信信道

● 通信信道的基本特性

1) 存在噪声干扰，理想情况下可假定为加性高斯白噪声(AWGN)；

2) 经信号经信道传输后会出现强度衰减，当无线通信系统的收发端之间或中间反射体相对于收发段存在相对运动时，还会引入多普勒频移；

3) 经信道传输后可能出现信号失真，包括信号波形、频谱形状的线性和非线性失真；无线通信中常常存在多径衰落(Fading)现象；信号经衰落信道传输后，信号传输衰减因子有可能是复

数随机变量，接收信号有可能是多个不同延迟信号分量的加权线性组合。信号失真对数字通信的直接影响是引起码间干扰和误码率上升。

4) 信道的频带是受限的，被传输的信号频带必须小于或等于信道带宽；无线通信

5) 经信道传输的功率是受限的，因此通常接收信号的信噪比都不高，而希望系统能在尽可能低的信噪比条件下工作。

● 通信信道的种类及其特性

1) 有线信道：常见的有线信道有双绞线、同轴电缆和波导，它们的带宽可分别达到 1MHz、2GHz、100GHz 的数量级。

2) 光纤和空间光信道：光纤信道可达到 Tb 级 (10^{12} bps) 的信息速率，其传输衰减比电缆小得多，而且可靠性更高。空间光通信也可以达到很高的信息速率，但是在大气中衰减较大，在太空中传输有很大优势，但是需要高精度方向对准。

3) 无线电磁信道：电磁波的传播需要借助发送、接收天线，天线的尺寸通常必须大于波长的 1/10，否则效率很低。电磁波信道的波段划分：

- 长波 (100KHz-200KHz)：主要靠地面波传播，具有较强的绕射能力和穿透能力；
- 中波 (200KHz—2MHz)：主要用于无线电广播；也有一定的穿透能力；
- 短波 (3-30MHz)：近处靠地面波传输，远处靠天波传输，即电离层的反射传播。
- 超短波 (30M-2GHz)：一般为视距传输，也可利用电离层或流星余迹的散射作用进行超视距通信。
- 微波 (2-60GHz)：主要靠视距传输，其频率资源很丰富，因而又划分为许多波段，分配给各种不同的应用。

不同波长电磁波传播性能存在较大差别，例如：频率在 5GHz 以下的无线电磁波，具有穿透丛林、建筑物等障碍物进行传输的能力；3~30MHz 的短波容易被大气上层电离层反射而能实现非视距远距离通信；100~200KHz 的长波可以传播海水平面以下几百米而适于对潜通信；音频频率范围的电磁波可以深入到土层几十米中传输而适于地下通信；而几百兆赫兹以上频率的电磁波可以穿透大气层和电离层传播，而适于卫星通信；几十吉赫兹的电磁波具有穿透等离子体层传输的能力，而适于邻地空间轨道飞行器的通信。地面无线电磁信道常常存在多径衰落现象，特别是宽带移动通信中，抗多径传输技术是最重要的研究课题。

4) 水声信道：电磁波在水中衰减很快，在海水中一般只能达到 $250/\sqrt{f}$ 米的深度，例如 10KHz 时深度为 2.5 米；声波可以在水下传播很远距离，衰减较小，但是存在严重的多径衰落现象，因为海水中声波传播速度为 1500m/s，波长为厘米级，因此在传播路径上存在水

面和海底之间多次反射。

- 5) 地下信道：超低频电磁波可以深入到地面以下上百米的土壤层中传播，但是需要很长的发射天线和很大的发射功率。地下岩层为半导体媒质，无线电磁波衰减很快，不能远距离传输。但是采用低频电流场方式进行传播，其传输距离也可达 1000 米以上；发送端和接收端都采用类似于偶极子那样的一对电极钉在岩层上，传输 3~30KHz 带宽的电信号，其强度衰减正比于距离的 4 次方。
- 6) 存储信道：磁介质、光盘或半导体存储，数据存/取过程类似于数字通信系统的信道传输。存储过程相当于发送过程，读取相当于接收过程，其中也会产生信号失真和噪声干扰，其存取过程需要借助信道编码、数字调制技术。例如：基于低轨道卫星的存储转发，可以在跨半个地球距离的条件下实现数字通信。

1.3 通信数字化的内涵和特点

1.3.1 通信数字化的内涵

通信数字化包括三方面的含义：

- 1) 传输信息的数字化：将待传输的信息尽可能表示为数字，并进行压缩编码；
- 2) 信号处理数字化：在发送接收过程中尽可能采用数字信号处理方法；
- 3) 通信设备数字化：通信系统中的设备中尽可能采用数字电路实现。

从上世纪 70 年代开始的通信数字化，到目前为止已经基本成熟和完善；当然模拟信号处理的技术和设备在通信中仍然有许多应用，有时是不可替代的，例如较高射频信号的处理仍然采用模拟技术和模拟器件。此外，声表面波器件（SAW）也是一种模拟信号处理器件，基于 SAW 的带通滤波器、傅里叶变换器、延迟线等器件，也有重要实用价值。

1.3.2 数字化通信信号处理

- 通信信号处理是通信理论与数字信号处理技术联姻的产物，数字信号处理技术在通信中的应用，引起了通信技术和通信系统革命性的发展。
- 通信信号处理的理论基础：包随机过程与随机信号处理、信息论、泛函分析、矩阵理论、数字信号处理、信号检测与估计、优化理论、通信原理等等。
- 通信信号处理的基本技术：包括有信源/信道编码技术；调制/解调技术，包括模拟信号调制/解调、数字调制/解调、多载波调制技术等；频谱扩展技术，包括直接序列扩频、软扩频、跳频等；通信同步技术，包括接收信号的载波同步、时相同步（帧同步、码元同步）；此外还有信号检测技术，信道估计和信道均衡技术，多址接入和信道复用技术，阵列信号处理和多输入—多输出系统技术，频率合成技术等。

- 通信信号处理中的模拟信号处理方法有三种实现方式，即电子电路实现、声表面波器件实现和光学处理实现；数字信号处理方法有基于可编程逻辑器件（CPLD、FPGA）的硬件实现和基于数字信号处理器（DSP）或其它 CPU 的软件实现两种方式。
- 基于数字信号处理方式实现通信信号处理的三个特点：
 - 1) 准确性：实际性能非常接近于理论性能，并且其精度可由参数和运算的字长来控制；
 - 2) 稳定性：性能指标不受环境温度差异、器件不一致性、供电电源波动等因素的影响；受时钟源频率稳准度的影响也常常可以忽略不计或者可以有效补偿；
 - 3) 可实现的数学模型的广泛性：除了能实现模拟处理方法能实现的各种功能之外，还能准确实现模拟电路难于实现甚至无法实现的某些功能，例如：宽带恒定移相器、希尔伯特变换器、线性相移甚至零群延迟滤波器等。

总之，通信的数字化已经达到了很高的程度，其基本理论和实现方法与模拟通信时代相比已经发生了质的飞跃性改变；它为通信系统和设备的设计、开发和推广应用带来了很高的效益。本书是介绍数字化通信理论和系统最新发展理念的一本综合性的教科书，力求尽可能简明扼要地综述所有最重要的相关理论，尽可能贴近数字通信系统设计和实现中当前实际应用的方法和思路，使读者便于理解和直接运用。

1.4 本书的主要内容和章节安排

1. 绪论
2. 数字通信的数学基础
3. 通信信源与信源编码
4. 数字调制与基带传输技术
5. 理想 AWGN 信道条件下的数字解调
6. 载波同步和码元同步
7. 通信信道与无线链路
8. 信道编码技术概要
9. 扩频通信技术概要
10. 失真信道条件下的信道均衡与最佳接收检测技术
11. 多通道协同传输技术
12. 多用户通信

主要参考书

- [1.1] John G. Proakis 著，张力军 张宗橙 郑宝玉等译《数字通信》（第4版）电子工业出版社 2003
- [1.2] John G. Proakis, Digital Communications (Fifth Edition) McGraw-Hill, 电子工业出版社 2009
- [1.3] 曹志刚 钱亚生 《现代通信原理》清华大学出版社 1992
- [1.4] 黎洪松 张卫钢 《数字通信原理》西安电子科技大学出版社 2005