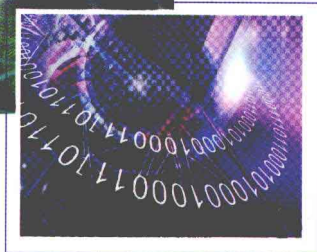
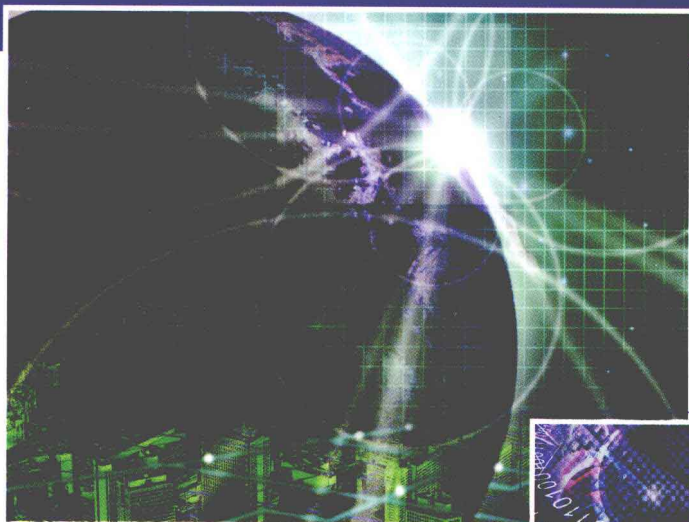




高等学校应用型特色规划教材

# 通信原理

栗向军 主编  
赵娟 副主编



免费赠送电子课件

- ◎ 本书寓系统性、理论性、工程性于一体，注重内容层次的衔接与递进。
- ◎ 突出通信系统的原理思想与技术思路，将数学原理与物理本质紧密结合，理论与分析与工程实际紧密结合。
- ◎ 内容全面，条理清晰，重点突出，例题丰富，便于教学与自学。

清华大学出版社

高等学校应用型特色规划教材

# 通信原理

栗向军 主 编

赵 娟 副主编

清华大学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书主要讨论现代通信系统的基础理论、技术原理及系统分析方法。全书以数字通信系统的一般模型为主线,涵盖系统中各个模块,共 11 章内容,包括概论、信号分析基础、模拟调制系统、数字基带传输系统、数字带通传输系统、信源编码、信道编码、最佳接收技术、同步原理、现代通信系统简介、应用 SystemView 仿真通信系统。

本书寓系统性、理论性、工程性于一体,注重内容层次的衔接与递进,突出通信系统的原理思想与技术思路,将数学原理与物理本质紧密结合、理论分析与工程实际紧密结合,内容全面,条理清晰,重点突出,例题丰富,便于教学与自学。

本书适合用作普通高等院校通信工程、信息工程、电子科学与技术等电子信息类专业通信原理课程的教材,也可供相关领域的科研和工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

通信原理/粟向军主编;赵娟副主编.——北京:清华大学出版社,2011.9  
(高等学校应用型特色规划教材)

ISBN 978-7-302-26311-1

I. ①通… II. ①粟… ②赵… III. ①通信理论—高等学校—教材 IV. ①TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 149911 号

责任编辑:李春明 郑期彤

装帧设计:杨玉兰

责任校对:李玉萍

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 刷 者:北京市人民文学印刷厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:25 字 数:604 千字

版 次:2011 年 9 月第 1 版 印 次:2011 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:45.00 元

产品编号:038724-01

# 前 言

近 10 年来，中国信息产业以 3 倍于 GDP 的速率高速增长，并成为国民经济第一支柱产业。与之相适应，与通信有关的信息类工科专业亦成为我国高等院校重点建设的热门专业。通信原理是通信工程、信息工程、电子科学技术等电子信息类专业的必修课程，也是一门重要的专业基础理论课程和研究生入学考试课程，旨在培养学生了解和掌握现代通信系统的基础理论、技术原理和系统分析方法。该课程又是普遍公认的比较难学的课程之一，大多数学生在学习中感觉有较大的难度和压力，很多学生在学完之后总感觉思路不清晰，重点不突出，内容很繁杂，难以把握。尤其对应用型本科院校来说，大多数学生理论基础相对比较薄弱，学习起来难度更大。从教学的角度看，通信原理课程具有如下特点。

(1) 应用的基础知识多。要学好通信原理这门课程，需要具备三方面基础：工程数学(概率论、数理统计、随机过程)基础、电路(模电、数电、高频)基础、信号与系统基础。通信系统中的信号和噪声都认为是一种平稳随机过程，采用随机信号分析方法确定其可靠性指标(误码率)，这种方法贯穿于整个课程的学习当中，是学习通信原理的精髓。对系统的设计，实质上是一种信号设计，在信号与系统课程中学习过的时频分析法等内容在通信原理的学习中将进一步得到应用与深化，这是学习通信原理的重点。原理的实现最终还是要依托电路，通过电路实现进一步加深对原理的认识，同时提高工程实践能力，这是学习并掌握通信原理课程的关键。

(2) 知识面广，系统性强。通信系统种类繁多，技术全面而复杂，而通信原理只涉及现代多种通信系统共同具备的基本原理和基本分析方法，因此，学习通信原理首先要有系统模型的概念。通过该模型，透彻理解系统中各个模块的功能、技术及指标，掌握系统中信号流程及基本变换关系，从而全面把握整个课程的知识体系。

(3) 理论性强，数学推导与物理概念并重。通信原理中的数学推导很多，这意味着要记忆的公式和结论很多，但是这种记忆一定是在理解的基础之上，要结合物理概念来理解，两者并重，缺一不可。没有必要的数学推导，就不可能对物理概念有全面深入的理解，但数学推导不是目的，它只是一种手段或者工具，目的是加深对原理概念的认识。例如，数字通信系统中的码间串扰现象，首先要了解码间串扰的定义和含义，然后通过若干合理的假设作定量分析，得到码间串扰数学表达式，从物理上理解影响码间串扰的主要因素，进而深入领会应该怎样构建合适的基带传输特性以消除码间串扰。

(4) 工程性强，理论和实践结合紧密。通信原理的理论只有应用于实际工程实践当中，学会应用所学的理论知识分析解决具体的工程应用问题，才是理论教学的根本目的所在。因此，通信原理课程的教学，绝不是单纯的理论教学，而应该采用多维的教学手段，将理论教学、课堂仿真、课程实验有机地结合起来。有条件的学校还应该再结合项目设计与生产实习，强化实践教学，促进知识向能力的转化。

(5) 内容新颖，技术更新快。人类社会进入 21 世纪以来，以通信、计算机和信号处理为核心的现代信息技术的迅猛发展，加速了全球经济化和社会信息化的进程。随着各种通



信新技术、新业务、新系统的不断涌现,通信系统已成为现代信息基础设施的核心和信息网络最重要的组成部分。在通信原理课程教学中,应该密切关注本领域学术前沿,跟踪新技术的发展,这对学生来说是一种要求和提高,可以增强学习兴趣,提高专业素养。

基于以上考虑,围绕本课程的基本特点和规律,本书在编写过程中十分注重内容的衔接与递进、知识的广度与深度、表达的通俗与准确,突出重点、分散难点。本书全面系统地介绍了现代通信系统的基本组成、各部分工作原理、技术性能指标分析、实际工程应用及采用的最新技术与发展趋势。为充分体现应用型特色教学需要,各章节内容的安排力争科学系统、简明扼要、条理清晰、层次连贯,知识的表达力求理论分析简明、物理概念清晰、联系应用具体、注重启发思维。

第1章为概论,概要介绍通信系统的一般概念及常用术语,以对通信系统的组成、模型、性能指标以及本课程要研究的主要内容及信息论基础有一个初步的了解。

第2章为信号分析基础,主要介绍本课程最常用的两种分析研究方法:确知信号分析法和随机信号分析法。

第3章为模拟调制系统,主要介绍各种模拟线性调制(AM、DSB、SSB、VSB)和非线性调制(FM、PM)的基本原理,分析各种模拟调制系统的抗噪声性能。

第4章为数字基带传输系统,主要介绍数字基带信号的频谱特性,数字基带传输的码型及其特点,数字基带传输系统的组成及各部分功能,码间串扰的产生机理及表示,无码间串扰的条件及消除码间串扰的技术原理,数字基带系统抗噪声性能分析方法。

第5章为数字带通传输系统,主要介绍三种基本的二进制数字带通传输系统(ASK、FSK、PSK)及几种典型的改进型的数字带通传输系统。

第6章为信源编码,主要介绍语音波形编码(PCM、DPCM、 $\Delta$ M)的基本原理与实现方法,图像编码的基本原理及国际标准与算法,时分复用与数字复接的原理与方法。

第7章为信道编码,主要介绍差错控制编码的基本原理、工作方式及几种常用的差错控制编码(汉明码、循环码、卷积码)。

第8章为最佳接收技术,主要介绍最大输出信噪比准则、最小均方误差准则、最小错误概率准则及各种最佳准则情况下的最佳接收机模型设计。

第9章为同步原理,主要介绍通信系统中各种常用的同步方式(载波同步、位同步、群同步和网同步)的基本原理与实现方法。

第10章为现代通信系统简介,以移动通信系统为例,系统全面地介绍现代典型数字通信系统的结构组成、工作原理、关键技术以及发展概况。

第11章为应用 SystemView 仿真通信系统,通过实例介绍应用 SystemView 软件进行通信系统设计与仿真的基本步骤、原理和方法。

本书由来自多所高等院校的具有丰富教学经验的一线老师分工合作完成,栗向军老师编写第1章、第10章和第11章并统稿全书,赵娟老师编写第2章和第3章,黄慧老师编写第4章,冯璐老师编写第5章和第7章,黄彩云老师编写第6章和第9章,肖尚辉老师编写第8章。本书由栗向军老师任主编,赵娟老师任副主编。

由于作者水平所限,书中难免存在错误和不足之处,敬请各位老师和同学批评指正。

编者



# 目 录

<b>第 1 章 概论</b> ..... 1	<b>第 2 章 信号分析基础</b> ..... 43
1.1 通信的基本概念..... 1	2.1 确知信号分析..... 43
1.1.1 消息、信息、信号与通信..... 1	2.1.1 确知信号的分类..... 43
1.1.2 通信方式、传输方式、 同步方式、复用方式..... 2	2.1.2 确知信号的频域特征 (傅里叶变换)..... 46
1.1.3 通信频段..... 6	2.1.3 功率谱密度和能量谱密度..... 50
1.1.4 通信发展简史..... 7	2.1.4 卷积和相关..... 51
1.2 通信系统..... 9	2.1.5 确知信号通过线性时不变 系统..... 53
1.2.1 通信系统的类型..... 9	2.2 随机信号分析..... 54
1.2.2 通信系统的模型..... 10	2.2.1 随机变量和随机过程的 基本概念..... 54
1.2.3 数字通信系统的特点..... 11	2.2.2 随机过程的统计特征..... 55
1.2.4 通信系统的主要性能指标..... 12	2.2.3 平稳随机过程..... 60
1.3 通信网..... 14	2.2.4 平稳过程通过线性系统—— 随机过程变换..... 63
1.3.1 通信网的定义、组成及类型..... 14	2.2.5 窄带随机过程..... 66
1.3.2 通信网的拓扑结构..... 16	本章小结..... 69
1.3.3 现代通信网的分层结构..... 16	思考练习题..... 70
1.4 通信信道..... 17	<b>第 3 章 模拟调制系统</b> ..... 72
1.4.1 信道的类型..... 17	3.1 调制的功能及分类..... 72
1.4.2 信道的模型..... 19	3.1.1 调制的功能..... 72
1.4.3 信道特性及对信号传输的 影响..... 20	3.1.2 调制的分类..... 73
1.4.4 常见信道举例..... 25	3.2 线性调制系统..... 74
1.5 通信系统中的噪声..... 28	3.2.1 标准调幅..... 75
1.5.1 加性噪声的类型..... 28	3.2.2 抑制载波的双边带调制 (DSB-SC)..... 77
1.5.2 白噪声..... 29	3.2.3 单边带调制..... 78
1.5.3 高斯噪声..... 30	3.2.4 残留边带调制..... 79
1.5.4 高斯白噪声和窄带高斯噪声..... 31	3.2.5 线性调制的解调..... 80
1.6 信息论基础..... 33	3.3 角度调制系统..... 84
1.6.1 信息量与平均信息量..... 33	3.3.1 基本概念..... 85
本章小结..... 39	
思考练习题..... 40	

3.3.2 窄带角度调制.....	88	4.5.2 二进制单极性基带 传输系统 .....	135
3.3.3 宽带角度调制.....	90	4.6 部分响应系统.....	135
3.3.4 角度调制的解调.....	93	4.6.1 第 I 类部分响应系统 .....	136
3.4 模拟调制系统的抗噪声性能.....	95	4.6.2 一般形式的部分响应系统 .....	139
3.4.1 线性调制系统的抗噪声 性能.....	95	4.7 时域均衡技术.....	140
3.4.2 角度调制系统的抗噪声 性能.....	100	4.7.1 时域均衡的基本原理 .....	141
3.4.3 各种模拟调制系统的性能 比较.....	105	4.7.2 均衡的准则及实现 .....	143
3.5 频分复用.....	106	4.8 眼图.....	147
3.5.1 频分复用的基本原理.....	106	本章小结.....	149
3.5.2 频分复用的特点.....	108	思考练习题.....	149
3.6 复合调制与多级调制.....	108	<b>第 5 章 数字带通传输系统.....</b>	<b>152</b>
3.6.1 复合调制的原理及实现.....	109	5.1 二进制幅移键控系统.....	152
3.6.2 多级调制的原理及实现.....	109	5.1.1 二进制幅移键控信号的 分析 .....	152
本章小结.....	110	5.1.2 二进制幅移键控信号的 产生 .....	155
思考练习题.....	111	5.1.3 二进制幅移键控信号的 解调 .....	155
<b>第 4 章 数字基带传输系统.....</b>	<b>114</b>	5.1.4 二进制幅移键控系统的 抗噪声性能 .....	156
4.1 数字基带信号的码型与波形.....	114	5.2 二进制频移键控系统.....	161
4.1.1 数字基带信号的码型.....	114	5.2.1 二进制频移键控信号的 分析 .....	161
4.1.2 数字基带信号的波形.....	119	5.2.2 二进制频移键控信号的 产生 .....	163
4.2 数字基带信号的功率谱.....	119	5.2.3 二进制频移键控信号的 解调 .....	164
4.3 数字基带传输与码间串扰.....	122	5.2.4 二进制频移键控系统的 抗噪声性能 .....	166
4.3.1 数字基带传输系统的 组成及工作过程.....	122	5.3 二进制相移键控系统.....	170
4.3.2 数字基带传输系统的 定量分析——码间串扰.....	123	5.3.1 二进制相移键控信号的 分析 .....	170
4.4 无码间串扰的基带传输特性.....	124	5.3.2 二进制相移键控信号的 产生 .....	172
4.4.1 无码间串扰的时域条件.....	124	5.3.3 二进制相移键控信号的 解调 .....	172
4.4.2 无码间串扰的频域条件—— 奈奎斯特第一准则.....	125		
4.4.3 无码间串扰的基带 传输系统.....	129		
4.5 基带传输系统的抗噪声性能分析.....	132		
4.5.1 二进制双极性基带 传输系统.....	134		

5.3.4 二进制相移键控系统的抗噪声性能.....	173	6.3.1 图像压缩方法简介.....	224
5.4 二进制差分相移键控系统.....	175	6.3.2 常见图像压缩标准与算法.....	225
5.4.1 相位模糊问题及二进制差分相移键控信号分析.....	175	6.4 时分复用和数字复接.....	227
5.4.2 二进制差分相移键控信号的产生.....	176	6.4.1 时分复用的基本概念.....	227
5.4.3 二进制差分相移键控信号的解调.....	177	6.4.2 准同步数字系列.....	228
5.4.4 二进制差分相移键控系统的抗噪声性能.....	178	6.4.3 同步数字序列.....	230
5.5 四进制相移键控系统.....	183	本章小结.....	231
5.5.1 四进制相移键控的调制.....	183	思考练习题.....	232
5.5.2 四进制相移键控的解调.....	186	<b>第 7 章 信道编码</b> .....	234
5.6 最小频移键控和高斯最小频移键控.....	187	7.1 信道编码的基本概念.....	234
5.6.1 最小频移键控信号的分析.....	187	7.1.1 差错控制编码的基本方式和类型.....	234
5.6.2 最小频移键控信号的产生和解调.....	191	7.1.2 码重、码距与检错、纠错能力.....	236
5.6.3 最小频移键控信号的功率谱及误码性能.....	192	7.1.3 几种常用的差错控制码.....	238
5.6.4 高斯最小频移键控.....	193	7.2 线性分组码.....	240
5.7 多进制正交幅度调制.....	193	7.2.1 线性分组码的定义及性质.....	240
5.7.1 多进制正交幅度调制的基本原理.....	193	7.2.2 生成方程和生成矩阵 $G$ .....	242
5.7.2 多进制正交幅度调制的调制与解调.....	195	7.2.3 监督方程和监督矩阵 $H$ .....	243
本章小结.....	196	7.2.4 线性分组码的译码——伴随式(校正子) $S$ .....	244
思考练习题.....	197	7.2.5 汉明码.....	248
<b>第 6 章 信源编码</b> .....	199	7.2.6 线性分组码的实现.....	250
6.1 概述.....	199	7.3 循环码.....	251
6.1.1 信源编码的基本概念.....	199	7.3.1 循环码的含义与特点.....	251
6.1.2 信源编码的技术类型.....	201	7.3.2 循环码的生成多项式、生成矩阵和监督矩阵.....	253
6.2 语音的波形编码.....	203	7.3.3 循环码的编译码方法.....	256
6.2.1 脉冲编码调制.....	204	7.4 卷积码.....	258
6.2.2 差分脉冲编码调制.....	218	7.4.1 卷积码的基本原理.....	258
6.2.3 增量调制.....	219	7.4.2 卷积码的代数表示.....	259
6.3 图像编码.....	224	7.4.3 卷积码的图形表示.....	262
		7.4.4 卷积码的译码方法.....	264
		本章小结.....	265
		思考练习题.....	266
		<b>第 8 章 最佳接收技术</b> .....	268
		8.1 引言.....	268





8.2 最大输出信噪比准则和匹配滤波接收机.....269	9.4.2 数字同步网中的时钟及其应用 .....313
8.2.1 最大输出信噪比准则.....269	本章小结.....314
8.2.2 匹配滤波接收机.....269	思考练习题.....314
8.2.3 典型实例分析.....272	<b>第 10 章 现代通信系统简介 .....316</b>
8.2.4 匹配滤波器在最佳接收中的应用.....273	10.1 移动通信概述.....316
8.3 最小差错概率准则和最佳接收机.....274	10.1.1 移动通信的定义、特点 .....316
8.3.1 数字信号接收的统计模型.....274	10.1.2 移动通信的发展历程 .....317
8.3.2 最小差错概率准则.....276	10.1.3 移动通信的工作频段 .....318
8.3.3 最佳接收机结构.....278	10.2 GSM 移动通信系统.....319
8.4 确知信号的最佳接收机 .....279	10.2.1 GSM 系统的主要性能参数 .....320
8.4.1 二进制确知信号的最佳接收.....279	10.2.2 GSM 系统的结构与功能.....320
8.4.2 二进制确知信号的最佳接收机误码性能.....281	10.2.3 GSM 系统的接口与协议.....323
8.5 最佳基带传输系统.....283	10.2.4 GSM 系统技术原理.....326
8.5.1 最佳基带传输系统的组成.....283	10.3 第三代移动通信系统简介.....341
8.5.2 最佳基带传输系统的误码性能.....285	10.3.1 IMT-2000 无线接口和无线传输技术方案 .....341
8.5.3 典型实例分析.....287	10.3.2 IMT-2000 标准.....342
本章小结.....289	10.3.3 IMT-2000 系统的基本结构 .....345
思考练习题.....290	10.3.4 3G 的关键技术.....346
<b>第 9 章 同步原理 .....293</b>	10.4 第四代移动通信展望.....351
9.1 载波同步.....293	10.4.1 4G 技术的特点.....351
9.1.1 直接法.....294	10.4.2 4G 中的关键技术.....352
9.1.2 插入导频法.....296	本章小结.....354
9.1.3 载波同步系统的性能.....299	思考练习题.....355
9.2 位同步.....301	<b>第 11 章 应用 SystemView 仿真通信系统.....357</b>
9.2.1 插入导频法.....301	11.1 SystemView 简介 .....357
9.2.2 直接法.....302	11.1.1 SystemView 的功能与特点 .....357
9.2.3 位同步系统的性能.....304	11.1.2 基本库、专业库 .....359
9.3 群同步.....305	11.1.3 仿真步骤 .....359
9.3.1 连贯式插入法.....305	11.2 SystemView 基本操作与使用 .....360
9.3.2 间歇式插入法.....309	11.2.1 库选择操作 .....360
9.3.3 群同步的性能分析.....310	11.2.2 系统定时 .....362
9.4 网同步.....312	
9.4.1 网同步原理.....312	

11.2.3 在分析窗中观察分析结果.....	363	思考练习题.....	378
11.3 通信系统仿真实例.....	366	附录 A 通信工程常用函数.....	380
11.3.1 PCM 通信系统仿真.....	366	附录 B 希尔伯特变换.....	384
11.3.2 QPSK 调制解调系统仿真.....	371	参考文献.....	386
11.3.3 (7,4)汉明码编译码器仿真.....	375		
本章小结.....	378		

# 第 1 章 概 论

## 教学目标

通过本章的学习，初步了解通信的发展、应用和现状，了解通信系统和通信网概况；理解消息、信息和信号的区别；熟悉数字通信系统的模型及各部分功能，掌握系统有效性和可靠性指标的含义及计算；了解信道的分类，建立信道的模型，分析其对信号传输的影响；掌握通信系统中噪声的类型及其特点；掌握信息量、平均信息量和信道容量的定义及计算方法。

通信原理以支持各种通信系统共同具备的基本理论为研究对象，内容涉及典型现代通信系统各个组成部分的工作原理及分析设计方法。本章概要介绍通信系统的一般概念及有关术语，以对通信系统的组成、模型、性能指标以及本课程要研究的主要内容及用到的信息论基础有一个初步的了解，如消息、信息、信号的概念，通信、通信系统、通信网的概念，码元速率和信息速率、误码率和误比特率的概念，信息量、平均信息量、信道容量的概念，调制与解调、编码与译码的概念，信道和噪声的概念等。

## 1.1 通信的基本概念

### 1.1.1 消息、信息、信号与通信

通信(Communication)是指通过某种媒体把信息从一地有效、可靠地传输到另一地的过程，以实现信息的传输和交换。有效是指传输的快慢，可靠是指传输的质量。在古代，人们通过飞鸽传书、击鼓鸣号、烽火报警等方式进行信息传递，这种通信方式古老而低级，有效性和可靠性都不高；在今天，随着科学技术的飞速发展，相继出现了固定电话、移动电话、互联网、可视电话等多种现代通信手段，通信速度越来越快，通信质量越来越高。

很显然，通信的任务就是传输信息(Information)。那么，如何衡量一个通信系统传输信息的能力呢？这就需要对被传输的信息进行定量的测度。几十年来，人们对信息这个概念一直众说纷纭，定义繁多，理解各异。随着信息科学的发展，这一概念在学术界的共识在逐步增加，在各学科之间逐渐通用起来。为了准确理解信息这一概念的含义，先来了解一个跟信息密切关联的概念——消息(Message)。

信息论先驱哈特莱(Hartley)1928年在《信息传输》这篇著名论文中指出：消息是具体的，其中蕴涵着信息，信息是包含在消息中的抽象量。这一概述高度概括了消息与信息之间的关系。我们知道，“Message”的原意就是“a piece of news”（一则消息），表明它是具体的。在通信工程中，一般将语音、文字、符号、图像、数据等统称为消息，它们都是实实在在的，可以凭五官感知的。而信息是一个抽象量，它可被理解为消息中包含的有意义

的内容,是消息的概括和抽象,它的多少可以采用信息量来衡量。举例来说,我们打电话时听到的声音就是消息,但是听到的声音里面只有有用的内涵才构成信息。

消息要进行传递必须以具体信号(Signal)的形式表现出来,信号是传递消息的载体。因此,通信就是从一地向另一地传递消息,给对方以信息。但消息必须借助于一定形式的信号(电信号、光信号、声信号等)才能传送并进行各种处理。因而,信号是消息的载体,是消息的表现形式,是通信的客观对象。例如,老师在课堂上讲课,具体讲授的内容即为信息,而所要传授的内容是通过语言表达的,老师表达的语言就是具体的消息,这种消息通过声波到达学生的耳膜(传感器)被大脑接收,声波即为信息的载体即信号。

广义地说,信号就是随时间和空间变化的某种物理量。若信号表现为电压、电流等,则称为电信号,它是现代技术中应用最广泛的信号。本书将只涉及电信号,它是带有消息的电压或电流,通常是时间变量 $t$ 的函数,信号随时间 $t$ 变化的函数曲线称为信号的波形,图 1-1 所示为电视台发射的彩条消息及对应的彩条信号。

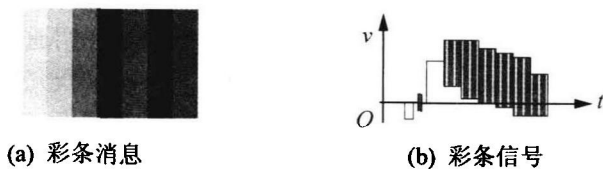


图 1-1 彩条消息与彩条信号

消息、信息、信号是与通信密切相关的三个概念,信息一词在概念上与消息意义相似,但它的含义更具普遍性、抽象性。消息可以有各种各样的形式,但消息的内容可统一用信息来表述,传输信息的多少可直观地使用“信息量”进行衡量。信号是消息的载体和通信的客观对象,信号设计是系统设计的精髓,从某种意义上说,系统设计就是信号设计。

### 1.1.2 通信方式、传输方式、同步方式、复用方式

首先建立点到点之间的通信模型。以最简单的语音通信——两个人之间的对话为例,这是利用声音来传递消息的通信,它包括 4 个基本组成部分:发话人是消息的来源,称为信源;语音通过空气传送到对方,传递消息的媒介(如空气)称为信道;收话人听到语音后获得消息,是消息的归宿,称为信宿;语音在传输过程中会不可避免地受到各种噪声的干扰,这些噪声通常分散在系统的各个地方,为简化分析通常将其集中表示在一处,与语音信号共同作用在信道上,称为噪声源。这样就完成了消息的传递,也就构成了最简单的通信系统,如图 1-2 所示。

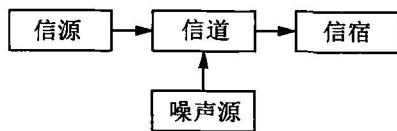


图 1-2 简单通信系统框图

基本的点对点通信,均是把消息从发送端传送到接收端,但对电通信而言,信源输出的信号是一种原始电信号,含有丰富的低频成分甚至直流分量,称为基带信号,它一般不适合直接在信道上传输,故需对其进行适当的变换,使其与信道特性匹配,由此得到一般通信系统的基本模型,如图 1-3 所示。图中,信源的作用是把各种消息转换成原始电信号;发送设备对原始电信号完成各种变换(如编码、调制、滤波、放大、发射等),使其适合在信道中传

输；在接收端，接收设备的功能与发送设备的功能相反，它能从来自信道的各种传输信号和噪声中恢复出相应的原始电信号；信宿则将复原的原始电信号转换成相应的消息。

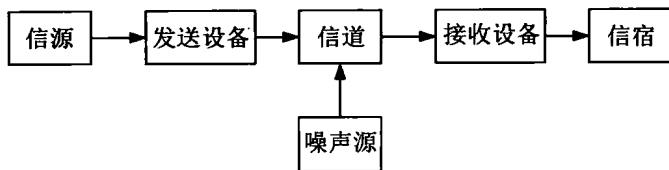


图 1-3 通信系统的基本模型

图 1-3 所示模型概括地反映了通信系统的共性。根据研究对象及所关心问题的不同，将会使用不同形式的较具体的通信系统模型，它们之间的区别主要体现在对基带信号的处理方式上。本课程的讨论就是围绕通信系统的这一基本模型而展开的。

以下介绍与通信系统有关的几个常用的基本概念：通信方式、传输方式、同步方式和复用方式。

### 1. 通信方式

通信的任务是传递消息，人类社会中需要传输的消息可以是声音、文字、符号、图像、数据等，根据运载消息的传输信号的物理方式(电、光、声等)的不同，现代通信方式有两种类型：电通信和光通信。

目前使用最广泛的是电通信技术，即采用电信号携带所传递的消息。用电通信方式传输信息时，首先在发送端将电信号通过多种变换、处理，然后上信道进行传输，到达接收端时再进行相应的逆变换、逆处理，从而达到通信的目的。这种通信具有迅速、准确、可靠等特点，而且几乎不受时间、空间、距离的限制。如今，自然科学领域涉及“通信”这一术语时，一般指的都是电通信，本书涉及的信号也都是电信号。随着通信技术的发展，将会出现一种与上述通信方式完全不同的技术——全光通信，它首先是在发送端将各种消息转换成光信号发送出去，然后在接收端将光信号还原，即信息的传输是以光传输方式进行的。

对于点到点通信，根据消息传送方向与时间的关系，通信方式又可分为单工通信、半双工通信及全双工通信 3 种，如图 1-4 所示。

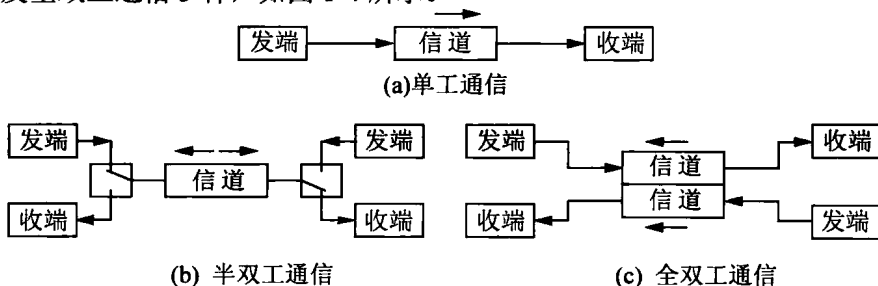


图 1-4 通信方式

(1) 单工通信(Simplex Communication)是指消息只能单方向传输的工作方式，如遥控、遥测、广播、无线寻呼等就是单工通信方式。单工通信信道是单向信道，发送端和接收端的功能是固定的，发送端只能发送信息，不能接收信息；接收端只能接收信息，不能发送信息。信号仅从一端传送到另一端，即信息流是单方向的。

(2) 半双工通信(Half-duplex Communication)可以实现双向通信,但不能在两个方向上同时进行,必须轮流交替地进行。或者说,通信信道的每一端既可以是发送端,也可以是接收端,但同一时间上,信号只能有一个传输方向。如日常生活中的对讲机、收发报机通信等。

(3) 全双工通信(Duplex Communication)又称为双向同时通信,其特点是通信双方既有发送设备,也有接收设备,并且允许双方同时在两条信道上发送和接收消息,即通信的双方可以同时发送和接收信息,如电话通信、计算机通信等。

## 2. 传输方式

按照数字信号的各个二进制位(又称比特)是否同时传输,数据的传输方式可分为并行传输(Parallel Transmission)和串行传输(Serial Transmission),如图 1-5 所示。例如,计算机与外部设备交换信息就有并行和串行两种基本方式。

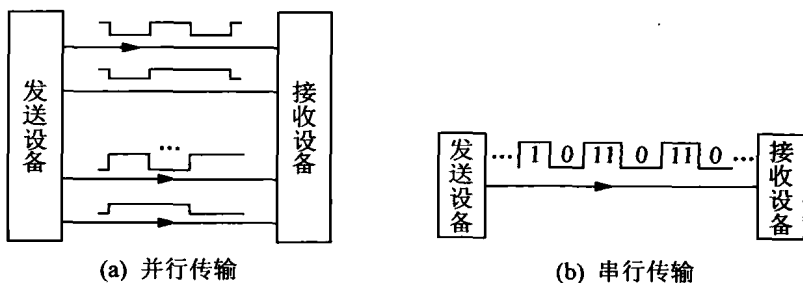


图 1-5 传输方式

(1) 并行传输是指在传输中有多个数据位同时在设备之间进行传输。举例来说,一个字符采用 ASCII 码编码是由 8 位二进制数表示的,则并行传输 ASCII 编码字符就需要 8 个传输信道,使表示一个字符的所有数据位都能同时沿着各自的信道并列传输。显然,采用并行传输在一个比特时间内就可以传输一个符号,故传输速率高,但由于它每位传输都要求一个单独的信道支持,通信成本高,而且由于信道之间的电容感应,远距离传输时可靠性较低,所以不支持长距离传输。如芯片内部的数据传送,同一块电路板上芯片与芯片之间的数据传送,以及同一系统中的电路板与电路板之间的数据传送等,多数采用并行传输方式。

(2) 串行传输是将组成字符的各位数据以串行方式在信道上传输,即采用一个信道按位先后有序地进行传输。以 8 位二进制码元表示的 ASCII 码编码字符为例,传输一个字符只需将该字符的 8 位信息由高位到低位依次排列按顺序传输,即将这些二进制码元串起来形成串行数据码流进行传输。显然,串行传输由于一次一位,故传输速率较低,但它只需一个信道,通信成本较低,而且支持长距离传输,目前计算机网络中所用的传输方式均为串行传输。常见的串行接口标准有 RS-232C、RS-422/485 和 20mA 电流环等。PC 上配置有两个 COM1 和 COM2 串行接口,它们都采用了 RS-232C 标准。

## 3. 同步方式

并行传输一次传送一个字符,因此收发双方不存在字符同步问题。串行传输存在一个收发双方如何保持码组或字符同步的问题,这个问题不解决,接收方就无法从接收到的数据流中正确区分出一个个字符来,这时传输将失去意义。针对串行传输的字符同步问题,目前有 2 种解决方法,即异步传输方式和同步传输方式。

(1) 异步传输(Asynchronous Transfer)是一种利用字符的再同步技术,即在字符的首末分别设置1位起始位和1位或1.5位或2位停止位,用它们分别表示字符的开始和结束,用头尾信息来进行同步。可以看出,此种方式效率较低,每个字符前后都要加开始和停止符。

(2) 同步传输(Synchronous Transfer)时的数据帧由同步字符(SYN)、数据字符和校验字符(CRC)组成,即在传送一组字符时需要加入1~2个同步字符和1~2个校验字符。同步字符位于帧的开头,用于确认数据字符的开始;数据字符在同步字符之后,个数没有限制,由所需传输的数据块长度来决定;校验字符用于接收端对接收到的字符序列进行正确性校验。由于每个字符间不需要附加位,故此传输方式效率较高,但双方需要事先约定同步的字符个数及同步字符代码,且中间传输有停顿时会失去同步,造成传输错误,所以要求发送时钟和接收时钟保持严格的同步。

#### 4. 复用方式

实现在同一条通信线路上传送多路信号的技术称为多路复用技术(Multiplex)。电信线路是构成电信网的基础设施之一,在整个电信网的投资中占有很大的比例。多路复用技术能够提高通信系统传输能力、扩大容量、挖掘潜力、降低成本。因而无论是有线传输系统还是无线传输系统,都在积极研究开发多路复用技术,以提高传输信道的利用率。在有线电信方面,由早期的传输线路一对线只能传送一路电话,发展到现在的—根光纤已能开通上百万路电话,而且还在继续提高;在无线通信方面,多路复用技术也得到广泛的应用,到20世纪90年代,新的卫星通信系统应用多路复用技术,能够承载约35 000路电话和多个电视节目的传输。

目前常用的多路复用方式主要有频分复用、时分复用、码分复用和空分复用。

##### 1) 频分复用

一般来说,物理信道的可用带宽远远超过单个原始信号的带宽,因此可将该物理信道的总带宽分割成若干个与传输单个信号带宽相同(或略宽)的子信道,每个子信道传输一路信号,这就是频分复用(FDM, Frequency Division Multiplexing)。多路原始信号在上信道前,先通过频谱搬移将各路信号的频谱搬移到物理信道频谱的不同频段上,使各路信号的频带互不重叠,这可以通过采用不同的载波频率进行调制来实现。同时,为保证各子信道中所传输的信号互不干扰,应在各子信道之间设立隔离带。

传统的FDM技术中各子载波的频谱是互不重叠的,需要使用大量的发送滤波器和接收滤波器,这就大大增加了系统的复杂度和成本。同时,为减小各子载波之间的相互串扰,各子载波间必须保持足够的频率间隔,从而降低了系统的频带利用率。现代正交频分复用(OFDM)系统采用了数字信号处理技术,各子载波的产生和接收都由数字信号处理算法完成,极大地简化了系统结构,同时为了提高频带利用率,使各子载波的频谱相互重叠,但这些频谱在整个符号周期内满足正交性,从而保证接收端能够不失真地还原信号。OFDM技术实质上是一种无线环境下的高速传输技术,它采用的是一种并行传输体制,即将高速串行数据变换成多路相对低速的并行数据并对不同的载波进行调制,这大大扩展了符号的脉冲宽度,从而提高了抗多径衰落性能。

波分复用(WDM, Wavelength Division Multiplexing)是光纤通信中的一种复用技术,它利用了一根光纤可以同时传输多个不同波长的光载波的特点,把光纤可能应用的波长范围划分成若干个波段,每个波段用作一个独立的通道传输一种预定波长的光信号。WDM本

质上也是频分复用,只是由于光波频率极高,通常采用波长来描述,故是一种光频分复用。在每个光载波占用的频段极窄、光源发光频率极其精确的前提下,WDM在一根光纤上承载多个波长(信道)系统,将一根光纤转换为多条“虚拟”光纤,每条虚拟光纤独立工作在不同波长上,这样极大地提高了光纤的传输容量。由于WDM技术的经济性与有效性,使之成为当前光纤通信网络扩容的主要手段。

#### 2) 时分复用

时分复用(TDM, Time Division Multiplexing)是指将提供给整个信道传输信息的时间划分成若干时间片(简称时隙),并将这些时隙分配给每一个信号源(用户)使用,每一路信号在分配给自己的时隙内独占信道进行数据传输。TDM技术的特点是时隙事先规划分配好且固定不变,所以有时也称为同步时分复用。TDM的优点是时隙分配固定,便于调节控制,适于数字信息的传输;缺点是当某信号源没有数据传输时,它所对应的信道会出现空闲,而其他繁忙的信道无法占用这个空闲的信道,因此会降低线路的利用率。TDM技术与FDM技术一样,有着非常广泛的应用,移动电话与固定电话通信就是其中经典的例子。

#### 3) 码分复用

基于码分复用(CDM, Code Division Multiplexing)和多址技术的码分多址(CDMA, Code Division Multiple Access)系统是随着扩频通信技术发展起来的一种新型而成熟的无线通信系统。FDM的特点是信道不独占,而时间资源共享,每一子信道使用的频带互不重叠;TDM的特点是独占时隙,而信道资源共享,每一个子信道使用的时隙不重叠;CDMA的特点是系统为每个用户分配各自特定的地址码,地址码之间具有相互准正交性,所有子信道在时间、空间和频率上都可以重叠,因此,信道的效率高,系统的容量大。

CDMA的技术原理是基于扩频技术,即将需传送的具有一定信号带宽的信息数据用一个带宽远大于信号带宽的高速伪随机码(PN)进行调制,使原数据信号的带宽被扩展,再经载波调制并发送出去;接收端使用完全相同的PN码,与接收的宽带信号作相关处理,把宽带信号换成原信息数据的窄带信号(即解扩)。CDMA技术完全适合现代移动通信网的大容量、高质量、综合业务、软切换等要求,在许多国家获得了广泛的应用。

#### 4) 空分复用

空分复用(SDM, Space Division Multiplexing)是指多对电线或光纤共用一条缆的复用方式。例如5类线就是4对双绞线共用一条缆,还有市话电缆(几十对)也是如此。能够实现SDM的前提条件是光纤或电线的直径很小,可以将多条光纤或多对电线做在一条缆内,既节省外护套的材料又便于使用。

多路复用最常用的两个设备是多路复用器和多路分配器,前者在发送端根据约定规则把多个低带宽信号复合成一个高带宽信号,后者根据约定规则再把高带宽信号分解为多个低带宽信号。这两种设备统称为多路器(MUX)。

### 1.1.3 通信频段

通信设备工作的频率范围称为通信频段。由于频率 $f$ 与波长 $\lambda$ 之间满足如下关系:

$$f = c/\lambda \quad (1-1)$$

式中, $c=3\times 10^8\text{m/s}$ 为光速,因此,频段也可以用相应的波段来表示。在通信工程上,频率较低时一般采用频段称呼,频率较高(波长较短)时通常采用波段称呼。



表 1-1 给出了现代通信中的常用频段及典型应用。

表 1-1 通信频段及其应用

频率范围(频段)	波长范围(波段)	物理信道(传输媒介)	应用举例
3Hz~30kHz(甚低频 VLF)	$10^8 \sim 10^4$ m(超长波)	有线线对, 长波无线电	音频、电话、数据终端
30~300kHz(低频 LF)	$10^4 \sim 10^3$ m(长波)	有线线对, 长波无线电	导航、信标、电力线通信
300kHz~3MHz(中频 MF)	$10^3 \sim 10^2$ m(中波)	同轴电缆, 中波无线电	调幅广播、移动陆地通信
3~30MHz(高频 HF)	100~10m(短波)	同轴电缆, 短波无线电	短波通信、业余无线电
30~300MHz(甚高频 VHF)	10~1m(米波)	同轴电缆, 米波无线电	电视、调频广播、空中管制
0.3~3GHz(超高频 UHF)	10~1dm(分米波)	波导, 分米波无线电	电视、遥测、通信、导航
3~30GHz(极高频 SHF)	10~1cm(厘米波)	波导, 厘米波无线电	微波通信、卫星通信、雷达
30~300GHz(特高频 EHF)	10~1mm(毫米波)	波导, 毫米波无线电	卫星通信、雷达、射电天文
$10^5 \sim 10^7$ GHz(光波)	$3 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-6}$ cm	光纤, 激光, 光波导	光通信

根据表 1-1, 可以得到以下几个有用的结论。

(1) 通信频段是一种资源, 不同的通信频段, 对应着相应的物理信道, 具有相应的传播特点, 构成了不同的通信系统。各种实用的通信系统均有适合自己的通信频段。

(2) 不论是有线信道, 还是无线信道, 一般都是带通型信道。

(3) 在某个有限的通信频段内, 可能适用多种通信系统同时工作, 为避免相互干扰, 必须对这种有限频带进行有序的合理分配, 进行频谱管理, 确保信息安全。

### 1.1.4 通信发展简史

通信是一门古老而年轻的科学。早在远古时期, 人们就知道用烽火狼烟、飞鸽传信、驿马邮递等方式进行信息传递和交换, 这实际是一种依靠人的视觉与听觉的原始通信。19 世纪中叶以后, 随着电报、电话的发明和电磁波的发现, 通信技术就发生了根本性的巨大变革, 相继实现了利用金属导线来传递信息的有线通信和利用电磁波来传递信息的无线通信, 使神话中的“顺风耳”、“千里眼”变成了现实, 开始了人类通信的新纪元。

通信的历史可大致划分为 3 个阶段: 1838 年以电报传输开始的通信初级阶段; 1948 年以香农提出信息论开始的近代通信阶段; 1980 年以后光纤通信、移动通信、综合业务数字网、互联网崛起的现代通信阶段。以下是通信发展史上具有历史意义的若干重大事件。

- 1838 年: 莫尔斯成功研制出世界上第一台电磁式电报机。
- 1864 年: 麦克斯韦建立了一整套电磁理论, 预言了电磁波的存在。
- 1875 年: 贝尔发明了世界上第一台电话机。
- 1878 年: 在相距 300km 的波士顿和纽约之间进行首次长途电话实验获得成功。
- 1888 年: 赫兹证实电磁波的存在, 用实验证明了麦克斯韦电磁理论。
- 1907 年: 阿姆斯特朗发明了超外差式接收装置。
- 1920 年: 康拉德在匹兹堡建立了世界上第一家商业无线电广播电台。
- 1922 年: 菲罗·法恩斯沃斯设计出第一幅电视传真原理图。
- 1924 年: 第一条短波通信线路在瑙恩和布宜诺斯艾利斯之间建立。