

三阶法

大学课程学习与考研指导系列

# 通信原理

## 学习与考研指导

沙济彰 朱煜 戴本祁 编著

- 重点/难点/考点
- 方法/技巧/提示
- 基础篇：学习课程的良好益友
- 提高篇：期末考试的得力助手
- 考研篇：考研复习的实战演练



 科学出版社  
www.sciencepress.com

三阶法大学课程学习与考研指导系列

# 通信原理学习与考研指导

沙济彰 朱 煜 戴本祁 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书是樊昌信教授等编著的《通信原理》(第5版)一书的配套参考书,内容包括通信原理课程的基本内容和重点、难点释疑、考点、典型例题精解和考研习题精选及其解答;并提供了4套本科课程期末考试试题和4套硕士研究生入学考试试题。

为满足读者的不同要求,本书针对学生平时学习、期末考试、考研的需要,按照基础、提高、考研三个层次循序渐进地安排编写体例。其中,前11章的第1、3、4节以及第5节的部分内容可作为基础篇的内容;前11章的第2、5节可作为提高篇的内容;前11章第6节和第12章可作为考研篇的内容。

本书可供高等院校电子信息工程、通信工程、计算机与信息工程等专业的大学生作为复习参考书使用,亦可供报考相关专业硕士研究生的学生作为复习备考资料。

### 图书在版编目(CIP)数据

通信原理学习与考研指导/沙济彰,朱煜,戴本祁编著.—北京:科学出版社,2004

(三阶法大学课程学习与考研指导系列)

ISBN 7-03-012761-7

I. 通… II. ①沙… ②朱… ③戴… III. 通信理论-高等学校-教学参考资料 IV. TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 004025 号

责任编辑:钟 谊 段博原/文案编辑:邱 璐 姚庆爽

责任校对:陈丽珠/责任印制:安春生/封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2004年6月第一版 开本:B5(720×1000)

2004年6月第一次印刷 印张:28

印数:1—5 000 字数:533 000

定价:30.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

## 前 言

“通信原理”是通信工程、信息工程、电子信息工程专业的一门主干课程,也是一门专业平台课程。它从“信号与系统”、“高频电子线路”、“概率论”等课程引申而来,并为进一步学习各种类型的通信、信息系统和技术课程打下基础。随着现代通信技术的发展和深入,一些自动化、计算机等专业也纷纷为本科生和硕士生开设了“通信原理”课程,以拓宽其知识面,改善其知识结构,从而培养高素质人才。另一方面,“通信原理”课程又具有原理性强(抽象)、系统性强(全面)、数学分析多等特点,因而难以掌握和融会贯通。为了帮助读者学好本课程,作者编写了本书。

全书共 12 章。前 11 章的编排次序与樊昌信教授等编著的《通信原理》(第 5 版)相同,包括:绪论、随机信号分析、信道、模拟调制系统、数字基带传输系统、数字调制系统、模拟信号的数字传输、数字信号的最佳接收、差错控制编码、伪随机序列和同步。每章包括 6 节:第 1 节基本内容和要点,给出了本章的基本概念、基本原理、基本分析方法和重要结论;第 2 节难点释疑,阐明了学习本章可能遇到的难点,并将基本内容进一步深入和综合;第 3 节考点,给出了本章可能的考核点;第 4 节本章小结,对本章中的基本内容和方法作了归纳小结;第 5 节典型例题精解,除包括基本例题外,还纳入了提高题、综合题,并给出相应的说明或结论;第 6 节考研习题精选,列出了精心挑选和设计的练习题目,并附有习题题解。第 12 章综合试题及其解答,给出了本科课程期末考试和硕士研究生入学考试试题各 4 套,是我国若干所重点大学真题的集合。

为满足读者的不同要求,本书内容分为三个层次:前 11 章的第 1、3、4 节以及第 5 节的部分内容可作为基础篇的内容;前 11 章的第 2、5 节可作为提高篇的内容;前 11 章第 6 节和第 12 章可作为测试篇的内容。

本书由沙济彰、朱煜、戴本祁合作完成,其中朱煜博士负责第 1~3 章,戴本祁副教授负责第 9~11 章,沙济彰教授负责其余部分的编写,并对全书进行统稿。

本书以樊昌信教授等编著的《通信原理》(第 5 版)为主要参考书,同时亦参考了其他文献,在此谨向这些书的作者表示衷心的感谢。樊昌信教授曾就本书的编写提出过宝贵的意见,特向樊昌信教授致以真诚的谢意。王福昌教授亦提供了有益的帮助,顺致深切的感谢。此外,编者还要诚挚地感谢沙飒工程师以及硕士生郑嘉骏、孙洁挺、张伟利、姚晨、应延治,感谢科学出版社的钟谊、段博原编辑,没有他们的大力支持和协助,本书将难以问世。

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中难免会有疏漏,甚或谬误之处,恳请读者批评指正。

作者

2004年3月于华东理工大学

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 基本内容和要点	1
1.1.1 术语	1
1.1.2 通信系统模型	1
1.1.3 通信系统分类和通信方式	3
1.1.4 信息及其度量	5
1.1.5 主要性能指标	6
1.2 难点释疑	8
1.3 考点	9
1.4 本章小结	9
1.5 典型例题精解	10
1.6 考研习题精选	16
考研习题解答	18
第 2 章 随机信号分析	21
2.1 基本内容和要点	21
2.1.1 随机信号和随机噪声	21
2.1.2 随机变量	21
2.1.3 随机过程	22
2.1.4 平稳随机过程	24
2.1.5 高斯过程	26
2.1.6 窄带随机过程	27
2.1.7 白噪声	29
2.1.8 随相正弦波加窄带高斯过程	31
2.1.9 平稳随机过程通过线性系统	32
2.2 难点释疑	33
2.3 考点	35
2.4 本章小结	35
2.5 典型例题精解	38
2.6 考研习题精选	49
考研习题解答	51

<b>第3章 信道</b> .....	56
3.1 基本内容和要点 .....	56
3.1.1 概述 .....	56
3.1.2 恒参信道 .....	60
3.1.3 随参信道 .....	61
3.1.4 加性噪声(加性干扰) .....	63
3.1.5 信道容量 .....	65
3.2 难点释疑 .....	68
3.3 考点 .....	70
3.4 本章小结 .....	71
3.5 典型例题精解 .....	72
3.6 考研习题精选 .....	82
考研习题解答 .....	83
<b>第4章 模拟调制系统</b> .....	88
4.1 基本内容和要点 .....	88
4.1.1 基本概念 .....	88
4.1.2 幅度调制原理 .....	89
4.1.3 角度解调原理 .....	93
4.1.4 模拟调制系统抗噪性能分析 .....	98
4.1.5 频分复用、复合调制和多级调制 .....	103
4.2 难点释疑 .....	104
4.3 考点 .....	108
4.4 本章小结 .....	109
4.5 典型例题精解 .....	111
4.6 考研习题精选 .....	125
考研习题解答 .....	128
<b>第5章 数字基带传输系统</b> .....	134
5.1 基本内容和要点 .....	134
5.1.1 引言 .....	134
5.1.2 数字基带信号及其功率谱 .....	135
5.1.3 码型编码 .....	138
5.1.4 无码间干扰传输 .....	141
5.1.5 无码间干扰的基带传输系统的抗噪声性能 .....	147
5.1.6 眼图 .....	148
5.1.7 均衡 .....	149

5.2 难点释疑 .....	149
5.3 考点 .....	153
5.4 本章小结 .....	154
5.5 典型例题精解 .....	156
5.6 考研习题精选 .....	168
考研习题解答 .....	169
<b>第6章 数字调制系统</b> .....	<b>176</b>
6.1 基本内容和要点 .....	176
6.1.1 基本概念 .....	176
6.1.2 二进制数字调制原理 .....	177
6.1.3 二进制数字调制系统的性能比较 .....	183
6.1.4 多进制数字调制 .....	184
6.1.5 最小移频键控(MSK)基本概念 .....	189
6.2 难点释疑 .....	191
6.3 考点 .....	197
6.4 本章小结 .....	198
6.5 典型例题精解 .....	199
6.6 考研习题精选 .....	211
考研习题解答 .....	214
<b>第7章 模拟信号的数字传输</b> .....	<b>222</b>
7.1 基本内容和要点 .....	222
7.1.1 引言 .....	222
7.1.2 抽样定理与PAM .....	223
7.1.3 量化 .....	225
7.1.4 A律PCM .....	228
7.1.5 差分脉码调制(DPCM) .....	230
7.1.6 增量调制(DM, $\Delta M$ ) .....	232
7.1.7 PCM、DPCM、DM系统性能比较 .....	235
7.1.8 时分复用(TDM) .....	236
7.2 难点释疑 .....	238
7.3 考点 .....	243
7.4 本章小结 .....	243
7.5 典型例题精解 .....	245
7.6 考研习题精选 .....	258
考研习题解答 .....	261



<b>第 8 章 数字信号的最佳接收</b> ·····	269
8.1 基本内容和要点·····	269
8.1.1 最佳接收准则·····	269
8.1.2 二进制等概确知信号的最佳接收·····	269
8.1.3 最佳接收机与实际接收机的误码率比较·····	273
8.1.4 匹配滤波器·····	274
8.1.5 最佳基带传输系统·····	276
8.2 难点释疑·····	278
8.3 考点·····	280
8.4 本章小结·····	281
8.5 典型例题精解·····	282
8.6 考研习题精选·····	288
考研习题解答·····	291
<b>第 9 章 差错控制编码</b> ·····	297
9.1 基本内容和要点·····	297
9.1.1 概述·····	297
9.1.2 线性分组码·····	299
9.1.3 循环码·····	301
9.1.4 卷积码·····	304
9.2 难点释疑·····	306
9.3 考点·····	310
9.4 本章小结·····	310
9.5 典型例题精解·····	312
9.6 考研习题精选·····	322
考研习题解答·····	323
<b>第 10 章 伪随机序列</b> ·····	329
10.1 基本内容和要点·····	329
10.1.1 随机噪声、伪随机噪声和伪随机序列·····	329
10.1.2 $m$ 序列·····	329
10.1.3 伪随机序列的应用·····	332
10.2 难点释疑·····	334
10.3 考点·····	338
10.4 本章小结·····	338
10.5 典型例题精解·····	339
10.6 考研习题精选·····	343

考研习题解答·····	343
<b>第 11 章 同步</b> ·····	347
11.1 基本内容和要点·····	347
11.1.1 概述·····	347
11.1.2 载波同步·····	348
11.1.3 位同步·····	351
11.1.4 帧同步(群同步)·····	355
11.2 难点释疑·····	357
11.3 考点·····	361
11.4 本章小结·····	362
11.5 典型例题精解·····	363
11.6 考研习题精选·····	367
考研习题解答·····	369
<b>第 12 章 综合试题及其解答</b> ·····	373
12.1 本科“通信原理”课程期末考试试题·····	373
本科试题 1·····	373
本科试题 1 解答·····	375
本科试题 2·····	380
本科试题 2 解答·····	382
本科试题 3·····	386
本科试题 3 解答·····	388
本科试题 4·····	393
本科试题 4 解答·····	394
12.2 硕士研究生入学考试“通信原理”课程试题·····	398
考研试题 1·····	398
考研试题 1 解答·····	401
考研试题 2·····	407
考研试题 2 解答·····	409
考研试题 3·····	414
考研试题 3 解答·····	418
考研试题 4·····	424
考研试题 4 解答·····	426
<b>附录 A 常用数学公式</b> ·····	431
<b>附录 B Q 函数表</b> ·····	433
<b>参考文献</b> ·····	435

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 基本内容和要点

### 1.1.1 术语

#### 1) 通信

由一地向另一地传递消息。这是通信的最早含义——传输,现已扩展到交换、网络等。

#### 2) 消息

信息源所产生的信息的物理表现,如语音、图像以及电报、文字、符号等。前者称为连续消息(消息的状态连续);后者称为离散消息(消息的状态离散或可数)。

#### 3) 信息

消息中所包含的对受信者(信宿)有意义的内容。

#### 4) 信号

消息的物理载体。在通信系统中,此“信号”常指电信号。于是,信号又是指消息的电载体;具体说来,是用电信号的某一参量来承载消息。若该参量连续取值,则为模拟信号;若该参量只能离散取值,则为数字信号。

### 1.1.2 通信系统模型

#### 1. 一般模型

点对点通信系统的一般模型如图 1-1 所示。

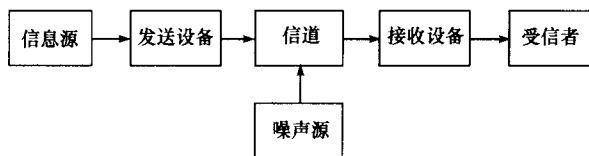


图 1-1 通信系统一般模型

#### 1) 信息源

信息源的功能是把消息转换成原始电信号(基带信号),即完成非电量→电量的变换。其典型例子有话筒(语音→音频信号)、摄像机(图像→视频信号)、电传机(键盘字符→数字信号)等。

#### 2) 发送设备

发送设备的主要功能有两点:放大和变换。要把信号传往远处,就必须把它放

大到具有足够的功率,再发送出去。变换包括编码、调制等,其目的是使变换后的信号适于在相应信道中的传输。

### 3) 信道

信道是指信号传输的通道,可分为无线和有线两大类。通常,信号在信道中传输时会受到衰减和畸变。同时,在通信系统模型中,信道是噪声(干扰)集中加入之处。

### 4) 接收设备

接收设备完成放大和反变换两个功能。经过信道传输后到达接收端的信号往往电平很弱,就需要再作放大。反变换则是完成与发送设备中的变换相反的功能,如解码、解调等。

### 5) 受信者

受信者是通信系统的终点,完成与信源相反的功能,即电量→非电量的变换;典型例子有:扬声器、显像管、计算机等。

### 6) 噪声源

噪声源是信道中噪声和系统其他各处噪声的等效集中表示。

## 2. 模拟通信系统模型

模拟通信系统指在信道中传输模拟信号的通信系统,模型如图 1-2 所示。

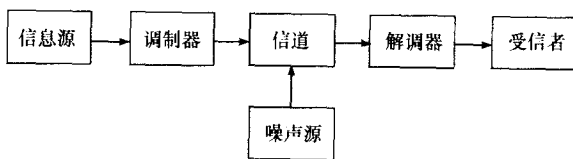


图 1-2 模拟通信系统模型

与图 1-1 相比,发送设备换成了调制器,接收设备换成了解调器。事实上,除了调制器外,发送设备还应包含放大、滤波、混频、辐射等环节。本模型中认为这些环节都足够理想,从而不再讨论。调制的功能是频谱变换,把基带(调制)信号的低通谱变换为频带(已调)信号的带通谱,以便与信道频率特性相匹配。由此可见,模拟通信系统主要完成两个变换功能:非电信号 ↔ 电信号,基带信号 ↔ 频带信号。

## 3. 数字通信系统模型

数字通信系统指在信道中传输数字信号的通信系统,模型如图 1-3 所示。

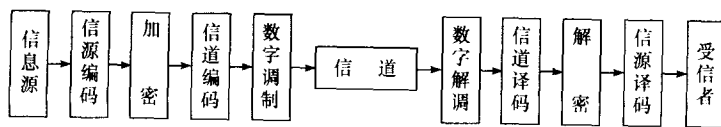


图 1-3 数字通信系统模型

(1) 信源编码:信源编码完成两个功能,一是提高消息传输的有效性,措施是采用各种压缩技术来减少信息的冗余度,从而降低误码率。二是完成 A/D 变换,即将模拟信源来的模拟信号变换为数字信号(第 7 章),以进入数字通信系统传输。

(2) 加密:提高数字信息传输的安全性(第 10 章)。

(3) 信道编码:提高数字信息传输的可靠性(第 9 章)。

(4) 数字调制:完成频谱搬移功能(第 6 章)。

数字解调、信道译码、解密、信源译码完成相应的相反功能。最后还需说明三点:第一,信源编码、加密、信道编码不一定都需要;第二,若不用数字调制/解调,则成为数字基带通信系统(第 5 章);第三,系统中还必须包括同步(第 11 章)。

4. 数字通信主要优缺点(与模拟通信相比)

1) 优点

(1) 抗干扰能力强,且噪声不积累,从而可中继,可多次复制(再生)。

(2) 可采用信道编码技术,降低误码率。上述两点使数字通信的可靠性得以提高。

(3) 数字信号易于处理(含压缩)、存储、变换等。

(4) 便于加密。

(5) 便于综合传输。

(6) 数字电路成本低。

2) 缺点

(1) 带宽大。例如:一路模拟电话的带宽为 4kHz,但一路数字电话的带宽可达到几十千赫(64kbit/s)。然而,随着压缩技术的发展,该缺点逐渐减小。

(2) 同步要求高(需要位同步、帧同步等),从而比较复杂。

总的说来,优点是主要的,因而数字通信系统得到快速发展,并且模拟信源发出的信息亦常借助于数字通信系统来传输(如上所述,先经 A/D 变换),数字电话即为此例。

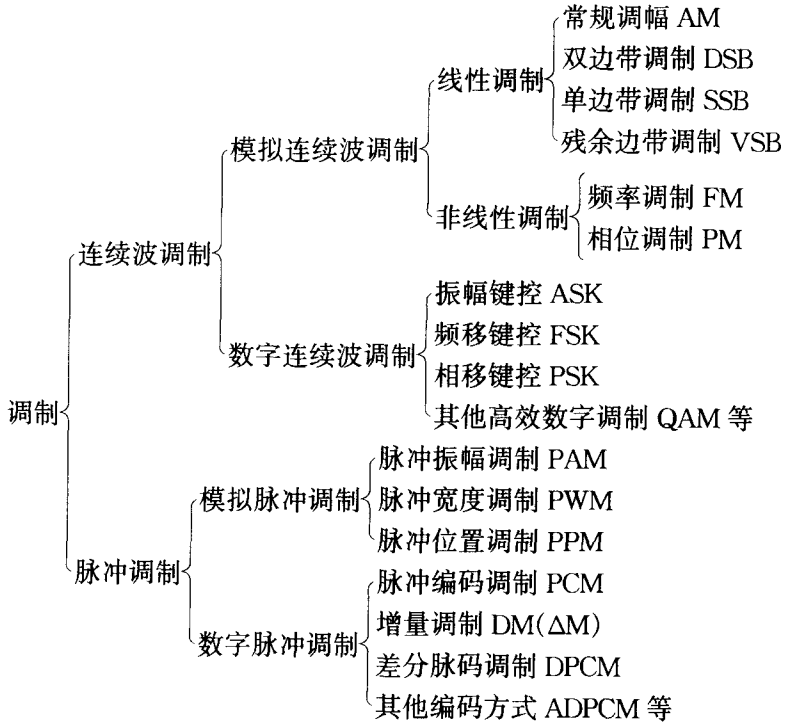
### 1.1.3 通信系统分类和通信方式

1. 通信系统分类

(1) 按被传输消息的物理特性分:电话通信系统、数据通信系统、图像通信系统等。

(2) 按调制方式分:总的说来,根据是否采用调制,可分为基带传输和频带(带通)传输两大类。基带传输是直接以基带信号来传输,而频带传输是对基带信号先进行调制,再以调制后的信号来传输。根据载波是连续波还是脉冲以及调制信号

是模拟信号还是数字信号,调制方式可分为四类。各种常见调制方式如下:



(3) 按传输信号的特征分:根据信道中传输的信号是模拟信号,还是数字信号,可分为模拟通信系统与数字通信系统。与上面相联系可知:模拟通信系统的调制信号是模拟信号,数字通信系统的调制信号是数字信号,反之亦然。

(4) 按传输媒介分:有线(含光纤)通信和无线通信系统。

(5) 按信号复用方式分:频分复用、时分复用、码分复用。

## 2. 通信方式

(1) 按消息传递的方向和时间分有:

① 单工通信:单向。如广播、无线寻呼。

② (全)双工通信:双向、同时。如电话。

③ 半双工通信:双向、不同时。如无线对讲机。

(2) 按数字信号码元排列方式分:串行(序)传输和并行(序)传输。

(3) 按传输拓扑结构分:

① 专线通信:点到点通信。

② 网通信:网内多点通信。

### 1.1.4 信息及其度量

#### 1. 信息含义

从表面看,通信的目的是传递消息,但真正对受信者有用的是信息。信息包含在消息之中。消息是具体的、表面的,而信息是抽象的、本质的。毫无疑问,不同消息包含的信息量不同。此外,不同受信者从同一消息中所获得的信息量亦不同,从而需要对信息进行度量。

#### 2. 信息量 $I$

##### 1) 原则

(1) 信息量是消息出现概率的函数。

(2) 消息出现的概率越小,所包含的信息量越大。

(3) 若某消息由若干个独立消息所组成,则该消息所包含的信息量是每个独立消息所含信息量之和(可加性)。

##### 2) 结论

某离散消息  $x$  所含的信息量为

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

式中,  $P(x)$  为消息  $x$  出现的概率。其单位是: 比特(bit), 对数的底  $a = 2$ ; 或奈特(nat), 对数的底  $a = e$ ; 或哈脱莱(hat), 对数的底  $a = 10$ 。

#### 3. 离散独立等概消息的信息量

离散: 消息集由  $M$  个可能的消息(事件)所组成, 每次只取其中之一。

独立: 各消息间相互统计独立。

等概: 各消息出现的概率相等( $P(x) = 1/M$ )。

##### 1) 二进制( $M = 2$ )

$$P(x) = 1/2$$

$$I = -\log_2 P(x) = 1(\text{bit})$$

结论: 对于等概的二进制波形, 其每个符号(码元)所包含的信息量为 1 bit。

回忆: 亦把二进制数码的每位称作 1 bit, 两者概念不同。

##### 2) $M$ 进制( $M = 2^N$ )

$$P(x) = 1/M = 2^{-N}$$

$$I = -\log_2 P(x) = \log_2 M = N(\text{bit})$$

结论: 等概  $M$  进制的每个符号(码元)所包含的信息量为  $N$  bit, 是二进制的  $N$  倍。二进制与四进制的波形比较如图 1-4 所示。由图可见, 二进制波形的每一码元

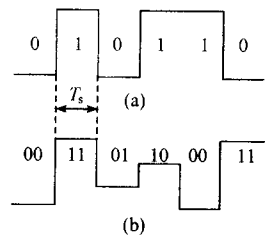


图 1-4 二进制与四进制的波形比较

传送 1 bit, 而四进制波形的每一码元则传送 2 bit, 因而四进制的传输有效性比二进制好。另一方面, 若两者的动态范围相同, 则四进制波形的相邻电平间隔比二进制小(图中为 1/3), 因而四进制的传输可靠性比二进制差。

#### 4. 离散独立非等概消息的信息量

##### 1) 平均信息量——熵 $H(X)$

**定义** 信源符号集中每个符号所包含的平均(统计平均)信息量。

$$H(X) = - \sum_{i=1}^M P(x_i) \log_2 P(x_i) \text{bit/符号, 或 nat/符号, 或 hat/符号} \quad (1-2)$$

式中,  $M$ ——符号集  $X$  中的符号(种类)个数;

$P(x_i)$ ——符号  $x_i$  所具有的概率。

**重要结论:** 最大熵出现于等概之时。等概时,  $P(x_i) = 1/M$ , 所以

$$H_{\max} = \log_2 M \text{bit/符号} \quad (1-3)$$

##### 2) 总信息量 $I$

若某符号集的熵为  $H(X)$ , 则当该符号集发送  $m$  个符号(从而组成一则消息)时, 所发送的信息量为

$$I = mH = - m \sum_{i=1}^M P(x_i) \log_2 P(x_i) \text{bit} \quad (1-4)$$

### 1.1.5 主要性能指标

除了一些公共的技术要求(如标准性、适应性、经济性、保密性等)外, 有效性和可靠性是通信系统性能的一对主要矛盾。有效性是指传输一定信息量时所占用的信道资源数(频率范围或时间间隔), 可靠性则是指接收消息的准确程度。

#### 1. 模拟通信系统

(1) 有效性: 带宽  $B$ 。

(2) 可靠性: 信噪比  $S/N$ 。化成分贝时,  $\text{SNR} = 10 \lg \left( \frac{S}{N} \right) \text{dB}$ 。

#### 2. 数字通信系统

1) 有效性: 传输速率

(1) 码元传输速率(码元速率、传码率、波特率)  $R_B$ :

**定义** 每秒钟传送的码元个数。

**单位** 波特(Baud, 简称为 Bd)。

若码元宽度为  $T$ , 则  $R_B = 1/T$ 。

(2) 信息传输速率(信息速率、传信率、比特率)  $R_b$ :

**定义** 每秒钟传送的信息量。



**单位** 比特/秒(bit/s)。

(3) 码元传输速率与信息传输速率间关系:

一般情况下  $R_b = R_B H$ , 等概时 ( $H = \log_2 M$ ): (1-5)

二进制:  $R_{b2} = R_{B2}$ , 但单位不同;

$M$  进制:  $R_{bM} = R_{BM} \log_2 M$ 。 (1-6)

(4) 二进制与多进制的比较(等概条件):

码元速率相同( $R_{B2} = R_{BM}$ )时

$$R_{bM} = R_{b2} \log_2 M \quad (1-7)$$

即在码元速率相同的情况下,  $M$  进制的信息速率比二进制高。

信息速率相同( $R_{b2} = R_{bM}$ )时

$$R_{BM} = R_{B2} \log_2 M \quad (1-8)$$

即在信息速率相同的情况下,  $M$  进制的码元速率比二进制低。

**结论** 从传输有效性考虑, 多进制比二进制好。

(5) 频带利用率(带宽效率)  $\eta_b$ :

**定义** 单位频带提供的码元传输速率, 或信息传输速率, 即

$$\eta_b = R_B/B \text{ (Bd/Hz)}, \text{ 或 } \eta_b = R_b/B \text{ (bit/(s} \cdot \text{Hz))} \quad (1-9)$$

**意义** 把带宽与传输速率相联系, 以便更好地考虑有效性。

**结论** 当等概且码元速率相同时

$$\eta_{bM} = \eta_{b2} \log_2 M \quad (1-10)$$

2) 可靠性: 差错率

(1) 误码率

$$P_e = \frac{\text{传错码元数}}{\text{传输总码元数}}$$

即码元在传输过程中被传错(码元丢失)的概率。

(2) 误信率(误比特率)

$$P_b = \frac{\text{传错比特数}}{\text{传输总比特数}}$$

即码元在传输过程中, 其信息量丢失的概率。

(3) 两者关系:

二进制:  $P_b = P_e$ ;

$M$  进制:  $P_b < P_e$ 。

**结论** 从传输可靠性考虑, 二进制比多进制好。

3) 有效性—可靠性: 一对主要矛盾

有效性  $\uparrow$   $\rightarrow$  速率  $\uparrow$   $\rightarrow$  带宽  $\uparrow$   $\rightarrow$   $P_e \uparrow$   $\rightarrow$  可靠性  $\downarrow$