



大学课程学习与考研
全程辅导系列丛书

名师教案
名师课堂
诠释再现

名师 大课堂

通信原理

徐家恺 阮雅端 赵康隰 编



科学出版社
www.sciencep.com



通信原理

张有林 张永明 张永明 编

中国大学计算机教育
计算机组成原理与系统结构

大学课程学习与考研全程辅导系列丛书

通信原理名师大课堂

徐家恺 阮雅端 赵康健 编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书包含的内容和习题涵盖了参考文献中所列各教材中涉及的知识点。全书共分为10章,每章均包括知识结构图、重难点解析、典型例题精解和习题精选。书后附有10份模拟试卷以及参考答案。

本书由富有教学经验的教师编写。可配合通信原理课的教学和学习,适合学习通信原理课程的学生和考研的同学学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

通信原理名师大课堂/徐家恺,阮雅端,赵康佳编.——北京:科学出版社,2005

(大学课程学习与考研全程辅导系列丛书)

ISBN 7-03-016632-9

I. 通… II. ①徐…②阮…③赵… 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(2005)第149208号

责任编辑:资丽芳 匡敏 于宏丽/责任校对:李奕莹

责任印制:张克忠/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>

丽源印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年5月第一版 开本:787×1092 1/16

2006年5月第一次印刷 印张:13

印数:1—4 000

字数:289 000

定价:18.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

《大学课程学习与考研全程辅导系列丛书》编委会

编委(按姓氏笔画排列):

于 枫 (吉林大学)

于洪珍 (中国矿业大学)

孙立山 (哈尔滨工业大学)

陈乔夫 (华中科技大学)

胡华强 (科学出版社)

徐家恺 (南京大学)

唐竞新 (清华大学)

梅晓榕 (哈尔滨工业大学)

程 靳 (哈尔滨工业大学)

焦其祥 (北京邮电大学)

责任编辑:

资丽芳 (科学出版社)

《大学课程学习与考研全程辅导系列丛书》出版说明

2006年教育部公布的最新数字显示：目前全国拥有普通高等学校1550余所；全国各级各类高等院校在校生总数超过2000万；高等教育已基本实现了由精英化向大众化的转变。

高等院校扩大招生，一方面极大地满足了我国社会主义建设对高素质人才的迫切需求，为当代青年的成才和发展提供了更高更好的平台；另一方面，其造成的最直接的矛盾就是招生与就业的矛盾。如何提高学习效果、培养科学的思维方法和解题能力、增强自身就业竞争力是广大学子面临的最为迫切的问题。为此，我们在北京地区的高校中进行了大量设计严密的，包括对教师、学生、课程、教材等各方面信息的调研，结果发现：名师的指点和加强自修练习成为解决上述问题最重要的选项。

基于上述原因，我们组织策划了本套丛书，同时面向全国重点高校遴选并约请长期在教学第一线的优秀教师，尤其是国家级教学名师和省级教学名师，来参与本套丛书的编写工作。一方面希望能使广大学子们受益于这些名师丰富的教学经验并掌握学习技巧，同时也给在教学第一线工作的青年教师们以示范和启发。本套丛书将针对大学本科课程的学习与考研对学生进行全程辅导，考虑到学生在学习的不同阶段、不同层次的不同需要，该套丛书将分成如下两个系列：

第一层次：“名师大课堂”系列——辅助课程学习，应对各种考试。

第二层次：“考研大串讲”系列——针对考研复习，帮助考生备考。

本套丛书的编写主要具有以下特点：

【定位明确，针对性强】本丛书针对不同的读者定位对课程学习的全程进行了科学的安排，分为课程学习和考研辅导两个层次。课程学习的指导部分重在帮助学生掌握知识要点，增强分析问题及解决问题的能力；考研辅导部分重在帮助参加研究生入学考试的学生掌握课程考点，迅速提高应试能力。

【名师开讲，经验丰富】本丛书充分挖掘优秀的教师资源，从全国各重点高校中约请经验丰富的任课教师参加编写，从基本知识到重点、难点进行全程讲解，对学生容易出错的地方进行分析，指导效果显著。

【源于基础，构建网络】本丛书在深入挖掘学科知识点的基础上，梳理各部分知识间的内在联系，把零散、孤立的知识交汇，编制成具有系统性、条理性的网络结构，使学生能够在解决问题时迅速地检索、提取和应用。

【全程优化，科学设计】本丛书根据学生学习的特点和要求，设计了不同的单元和模块，从知识点的归纳到理解再到运用，层层加深学生理解的程度，最终使学生能够达到熟练掌握所学知识并能灵活应用的目的。

【循序渐进，逐级提升】本丛书遵循由浅入深、由易到难、由简到繁的原则，例题和习题都设置了科学、合理的梯度与坡度，能够兼顾不同层次和水平的学生，使之成为

学生们十分有用而必备的学习工具。

我们相信，本套丛书的出版一定能够为提高我国高等教育的教学质量做出应有的贡献。

科学出版社高等教育分社

2006年5月

前 言

通信原理课程是通信工程专业的代表课程之一，也是其他电子信息类专业的必修课程之一。作为一门承上启下的课程，通信原理课程几乎涉及了在此之前的所有课程中学到的知识，因此对于该课程的学习效果与对先修课程知识的掌握程度密切相关。同时，它又是学习其他后续专业课程的基础，因此学好通信原理课程对于专业学习来说具有非常重要的意义。

通信原理课程的开设在我国已有约 30 年的历史。在此期间，技术在不断发展，教材也在不断更新，但课程的核心内容和基本的结构体系却一直延续下来。在通信原理课程教学的发展过程中，既包括新技术、新知识的补充，也包括教授方法的改进。从学习的角度来看，许多学生都有这样的体会，有积极性学习通信原理课程，搞懂其概念也不难，但要想学好学精却不容易。作为一本教辅材料，目的就是帮助学生学好这门课程，同时为进一步深造（比如读研等）提供方便。

本书包含的内容和习题涵盖了目前流行的几种通信原理教材（见参考文献）所涉及的知识点。全书共分 10 章：第 1 章概论，第 2 章信号分析与信息论基础，第 3 章信道与噪声，第 4 章模拟调制技术，第 5 章信源编码技术，第 6 章数字基带信号传输，第 7 章数字调制技术，第 8 章复用与多址技术，第 9 章差错控制编码，第 10 章数字信号的最佳接收。可供使用不同教材的学生选用作为学习辅导书。本书各章的编写分工是：徐家恺负责第 1、2、8、10 章，阮雅端负责第 3、7、9 章，赵康铤负责第 4、5、6 章。

本书是编者在多年教学工作的基础上，考虑到学生的学习规律编写而成的。热忱欢迎广大读者多提宝贵意见。读者可以通过以下电子邮件与作者联系：xcom@nju.edu.cn。

编者

2005 年 10 月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 名师指点	1
1.1.1 知识结构框图	1
1.1.2 重点	1
1.1.3 难点	2
1.2 名师课堂	2
1.2.1 典型例题精解	2
1.2.2 习题精选	3
第 2 章 信号分析与信息论基础	4
2.1 名师指点	4
2.1.1 知识结构框图	4
2.1.2 重点	4
2.1.3 难点	12
2.2 名师课堂	13
2.2.1 典型例题精解	13
2.2.2 习题精选	22
第 3 章 信道与噪声	26
3.1 名师指点	26
3.1.1 知识结构框图	26
3.1.2 重点	26
3.1.3 难点	32
3.2 名师课堂	32
3.2.1 典型例题精解	32
3.2.2 习题精选	36
第 4 章 模拟调制技术	38
4.1 名师指点	38
4.1.1 知识结构框图	38
4.1.2 重点	38
4.1.3 难点	46
4.2 名师课堂	47
4.2.1 典型例题精解	47
4.2.2 习题精选	51
第 5 章 信源编码技术	55
5.1 名师指点	55

5.1.1	知识结构框图	55
5.1.2	重点	55
5.1.3	难点	63
5.2	名师课堂	63
5.2.1	典型例题精解	63
5.2.2	习题精选	66
第6章	数字基带信号传输	70
6.1	名师指点	70
6.1.1	知识结构框图	70
6.1.2	重点	70
6.1.3	难点	77
6.2	名师课堂	77
6.2.1	典型例题精解	77
6.2.2	习题精选	82
第7章	数字调制技术	88
7.1	名师指点	88
7.1.1	知识结构框图	88
7.1.2	重点	88
7.1.3	难点	101
7.2	名师课堂	101
7.2.1	典型例题精解	101
7.2.2	习题精选	111
第8章	复用与多址技术	113
8.1	名师指点	113
8.1.1	知识结构框图	113
8.1.2	重点	113
8.1.3	难点	114
8.2	名师课堂	114
8.2.1	典型例题精解	114
8.2.2	习题精选	119
第9章	差错控制编码	121
9.1	名师指点	121
9.1.1	知识结构框图	121
9.1.2	重点	121
9.1.3	难点	130
9.2	名师课堂	130
9.2.1	典型例题精解	130
9.2.2	习题精选	136

第 10 章 数字信号的最佳接收	138
10.1 名师指点.....	138
10.1.1 知识结构框图	138
10.1.2 重点	138
10.1.3 难点	142
10.2 名师课堂.....	142
10.2.1 典型例题精解	142
10.2.2 习题精选	148
试卷.....	151
试卷一.....	151
试卷二.....	153
试卷三.....	155
试卷四.....	157
试卷五.....	159
试卷六.....	162
试卷七.....	164
试卷八.....	167
试卷九.....	169
试卷十.....	171
参考文献.....	174
习题精选参考答案.....	175
试卷参考答案.....	188

第 1 章 概 论

1.1 名师指点

1.1.1 知识结构框图

知识结构框图如图 1-1 所示。

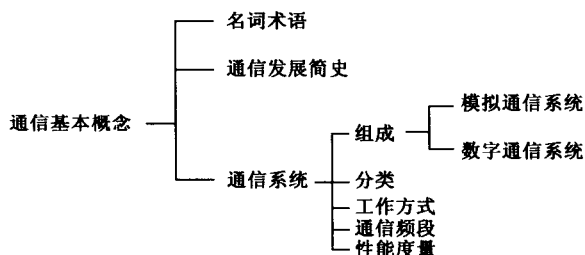


图 1-1 知识结构框图

1.1.2 重点

本章为了解通信学科的基础入门知识。虽然简单,但却很重要。

1. 通信系统构成

- ①模拟通信系统结构框图及各部分功能简介。
- ②数字通信系统结构框图及各部分功能简介,与模拟系统的差异。
- ③数字通信系统的特点。

2. 通信系统分类

- ①常用的分类方法和名称。
- ②各种通信方式的含义。

3. 通信系统性能度量

(1)名词术语

码元,码元宽度,传码率,传信率,误码率,频带利用率。

注意:码元宽度用 T_b 表示。它只取决于信号的持续时长,而与数字信号的波形无关。因此有关系式: $R_B = \frac{1}{T_b}$ 。

(2)基本性能度量指标

- ① 有效性。模拟系统有信号占用带宽;
数字系统有频带利用率 η_B 、 η_b 。

② 可靠性。模拟系统有输出信噪比；

数字系统有误码率。

在数字通信系统中,有效性和可靠性是一对互相矛盾的指标。其理论依据由香农公式揭示。实际系统的设计往往要根据实际需求在两指标之间进行取舍。

1.1.3 难点

本章主要是为下面的学习奠定基础,包括一些基本概念和一些常识性的基础知识,没有难点。

1.2 名师课堂

1.2.1 典型例题精解

1. 试计算下列各种频率的无线电波在自由空间的波长。

(1) 300Hz (用 km 作单位)。

(2) 27.255MHz(用 m 作单位)。

(3) 4GHz(用 cm 作单位)。

解 无线电波传播速度 $v=3\times 10^8\text{m/s}$ 。

(1) $f_1=300\text{Hz}$

$$l_1 = v/f = 3\times 10^8/300 = 1000(\text{km})$$

(2) $f_2=27.255\text{MHz}$

$$l_2 = v/f = 3\times 10^8/27.255\times 10^6 \approx 11.007(\text{m})$$

(3) $f_3=4\times 10^9\text{Hz}$

$$l_3 = v/f = 3\times 10^8/4\times 10^9 = 7.5(\text{cm})$$

2. 若规定 88~108MHz 频段为 FM 广播电台专用,每个电台需要占用 180kHz 有效频带,试问最多同时能收听多少电台的节目?

解 $N=(108-88)\times 10^6/180\times 10^3=[2\times 10^2/1.8]_{\text{取整}}=111$

本题也是一频分复用概念的题目。

3. 100kHz 频率发送导航信号,收、发之间相距 80km,试问收到的信号与发端信号相比较,相位差多少?

解 导航信号 $s(t)=A\cos(2\pi\times 10^5t+\phi_0)$

$$v=30\times 10^4\text{km/s}$$

$$l=80\text{km}$$

$$t_d=(80/3\times 10^5)\times 10^6=26\frac{2}{3}(\mu\text{s})$$

$$\text{信号周期 } T=1/10^5=10(\mu\text{s})$$

$$\Delta\phi=[26.67/10]_{\text{取小数}}\times 2\pi=\frac{4}{3}\pi$$

正弦波信号相位周期 2π ,取小数相当于模 2π 运算。

4. 若一个通信系统 2min 内传送了 1.2×10^8 个码元,求它的传码速率。若该段时间

共有 3 个码元的错误,试求出该时间段的误码率。

解 $R_B = 1.2 \times 10^8 / 2 \times 60 = 10^6 \text{ (Baud)}$

$$P_e = 3 / 1.2 \times 10^8 = 2.5 \times 10^{-8}$$

1.2.2 习题精选

1. 试计算下列各种频率的无线电波在自由空间的波长。

(1) 20kHz (用 km 作单位)。

(2) 1500kHz (用 m 作单位)。

(3) 175.25MHz (用 m 作单位)。

(4) 531.25MHz (用 cm 作单位)。

2. 若规定 535~1605kHz 频段为民用 AM 广播电台专用,每个电台需要占用 10kHz 有效频带,试问最多能同时收听到多少电台的节目?

3. 若规定 54~72MHz、76~88MHz 和 174~216MHz (VHF) 及 470~806MHz (UHF) 频段为电视广播专用频段,每个电台需要占用 6MHz 有效频带,试问在每个频段内最多能容纳多少套电视节目?

4. 已知二进制数字信号每个码元占有的时间为 1ms, 1、0 码等概出现,求:(1) 传码率;(2) 传信率。

5. 一个二进制数字通信系统,码元速率为 10^4 Baud ,连续发送 1h 后,接收到的错码为 10 个,求误码率 P_e 。

6. 试述码元、码元宽度、传码率、传信率、误码率的定义、单位和符号。

7. 试述衡量一个通信系统的主要性能指标及其具体的度量。

第2章 信号分析与信息论基础

2.1 名师指点

2.1.1 知识结构框图

知识结构框图如图 2-1 所示。

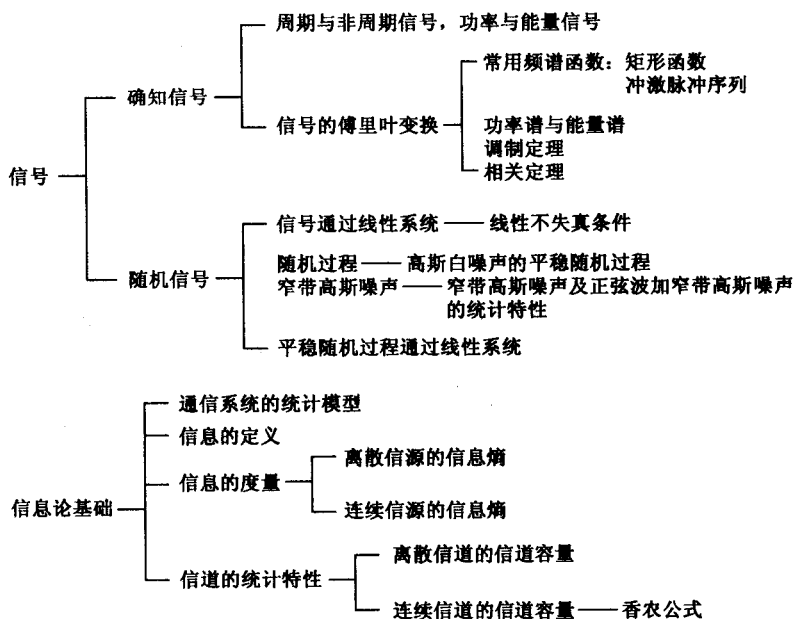


图 2-1 知识结构框图

2.1.2 重点

1. 确知信号分析

这一部分内容一般在信号与系统等先修课程中已学过。一些通信原理教材将其中与通信原理课程联系密切的知识要点汇集在此，主要是为了承上启下，加深印象，有利于后面知识的学习。

通信理论中，贯彻始终的一条主线就是信号。通信就是通过对信号的处理变换，以及信号通过通信系统从而实现信息的传递。本课程中的相当一部分内容都是以信号的数学分析为基础介绍通信技术的原理、系统的性能和实现的。

(1) 确知信号的含义

信号分为确知信号和随机信号。两类信号的分析方法是不同的。

确知信号是指可以用确定的函数表达式表示出来的信号。研究确知信号，除了通过

时域的方法以外还常常通过频域去研究。并且通过频域研究有时候显得更为简便和清晰。因此经常涉及的内容包括信号的时间表达式、频谱表达式及通过系统的各种变化。这一部分要求熟练掌握和运用的主要概念有傅里叶变换、幅频特性和相频特性、功率谱和能量谱、相关函数、相关定理(功率谱密度和自相关函数是一傅里叶变换对)、帕什瓦尔定理、信号通过线性系统等,常用的还有矩形脉冲的频谱表达式、冲击函数序列及其傅里叶变换、调制定理、卷积运算等。

(2) 傅里叶变换

周期函数的傅里叶级数展开式为

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{jn\omega_1 t} \quad (2-1)$$

式中

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{-jn\omega_1 t} dt \quad (2-2)$$

非周期信号的傅里叶变换对为

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2-3)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2-4)$$

矩形脉冲信号及时间的关系如图 2-2 所示。

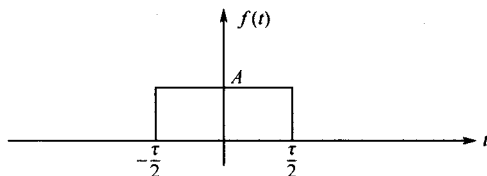


图 2-2 矩形脉冲 $f(t)$

矩形脉冲信号的波形及时间表达式为

$$f(t) = \begin{cases} A & -\frac{\tau}{2} < t < \frac{\tau}{2} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

其频谱函数 $F(\omega)$ 如图 2-3 所示, $F(\omega)$ 的表达式为

$$F(\omega) = A\tau \frac{\sin \frac{\omega \tau}{2}}{\frac{\omega \tau}{2}} = A\tau S_a\left(\frac{\omega \tau}{2}\right) \quad (2-5)$$

矩形脉冲信号是数字通信中常用的基带信号波形,不管是二进制还是多进制。矩形函数又称为门函数,用 $D_\tau(t)$ 表示。 $S_a(x)$ 又称为取样函数。取样函数 $S_a\left(\frac{\omega \tau}{2}\right)$ 是一收敛的正弦波,并且矩形波的频谱分布在整个频率轴上。实际的系统不可能具有无限的带宽,只能传送矩形信号的主要能量部分。例如,取该信号的第一个零点或若干个零点位置定义

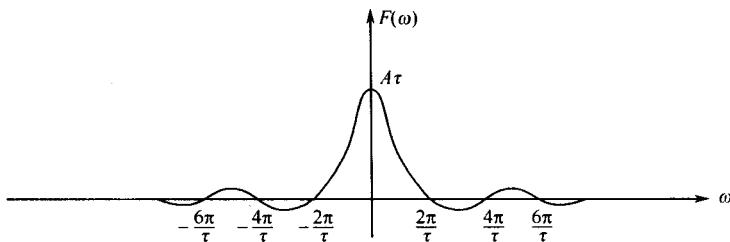


图 2-3 矩形函数的频谱函数

为该信号的有效带宽,若按第一个零点宽度定义,则该信号的带宽为 $\frac{1}{\tau}$ Hz,即脉冲宽度的倒数,在数值上也就等于系统的传码速率。矩形的面积 $A\tau$ 即 $F(0)$ 的值。

(3) 信号与系统带宽定义

带宽就是指所占用的频率宽度,是通信中经常接触到的概念。理论上讲,一个时间上有限长的信号,其频率分量是分布在整个频率轴上的,但实际系统的带宽是有限的。在满足信号传输基本要求的条件下,需要将信号带宽定义在一定的范围内。系统带宽的定义也有类似的情况。由于对信号或系统考虑的角度不同,常会采用不同的定义方式,初学者有时会产生一些问题。在数字通信中常常会用方波脉冲信号频谱特性的第一个零点或它的若干倍定义成该信号的带宽。做习题时,如未加说明,通常选择第一个零点位置,如前面描述的那样。此外对于带宽的定义,常用的还有以下几种:

① 根据带宽内的信号能量(或功率)占总能量(或总功率)的一定比例定义。比如设这个比例为 0.9,信号总能量为 E ,总功率为 P ,有关系式

$$\frac{\int_{-B}^{+B} E(2\pi f) df}{E} = 90\% \quad (2-6)$$

$$\frac{\int_{-B}^{+B} P(2\pi f) df}{P} = 90\% \quad (2-7)$$

式中, $E(2\pi f)$ 和 $P(2\pi f)$ 是信号的能量谱和功率谱表达式。

② 等效矩形带宽。其定义如图 2-4 所示。

表达式为

$$B = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} E(2\pi f) df}{2E(0)} \quad (2-8)$$

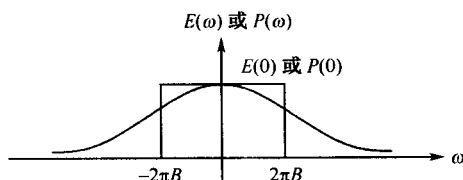


图 2-4 等效矩形带宽定义

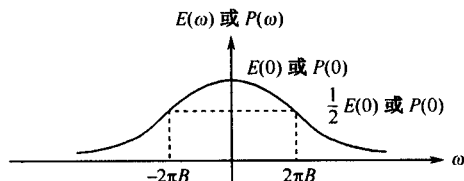


图 2-5 3dB 带宽定义