



普通高等学校“十二五”规划教材

- 主编 高明亮
- 编著 张心歌 吴韬

通信系统原理 简明教程



国防工业出版社
National Defense Industry Press

普通高等学校“十二五”规划教材

通信系统原理简明教程

主编 高明亮
编著 张心歌 吴韬

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书讲述通信系统的基本原理,共 25 讲。主要内容包括以下几部分:第一部分(第一讲)讲述这门课的绪论内容;第二部分(第二至五讲)讲述关于信号与系统相关内容;第三部分(第六讲)讲述关于信道的基础内容;第四部分(第七至九讲)讲述关于模拟信号频带传输的内容;第五部分(第十至十三讲)讲述关于模拟信号数字化的内容;第六部分(第十四至十七讲)讲述关于数字信号基带传输的内容;第七部分(第十八至二十一讲)讲述关于数字信号频带传输的内容;第八部分(第二十二至二十五讲)讲述关于数字信号最佳接收的内容。本书在保证各讲内容相对独立的基础上又顾全了整体内容的完整性与连贯性。

针对本课程的重点知识,各讲后面都设有相应的练习题,并附有参考答案,并且部分讲节给出了典型的例题。全书内容较为翔实,简明透彻,讲述通俗易懂,概念清楚,重点突出,适于大中专院校学生学习,也便于教师教学和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

通信系统原理简明教程/高明亮主编. —北京:国防工业出版社,2012.6

普通高等学校“十二五”规划教材

ISBN 978-7-118-08092-6

I. ①通... II. ①高... III. ①通信系统—高等学校—教材 IV. ①TN914

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 091414 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 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 11 字数 260 千字

2012 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 24.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

随着电子信息类专业的快速发展,《通信系统原理》这本书出版过众多的版本,也形成了多部经典教材。就当前各个版本教材而言,在具有系统性和完整性的基础上,各具特点。然而在各高校提出精简课堂教学时数的形势下,大多数教材暴露的共同的缺点,就是书本所安排的内容超过了教学学时任务,影响了这门课程的系统性和完整性。基于此,本书作者编写了这本《通信系统原理简明教程》。现将这本书的特点介绍如下。

第一,本书作者在高校从事过多年“通信系统原理”这门课程的教学工作,因此掌握了这门课程的教学内容以及授课过程中的各个教学环节。这本书是将作者多年讲授的讲稿进行整理完善形成的。因此,这本书能够体现本门课程在教学中的难点和重点知识。

第二,本书的内容安排简练。考虑到各个高校普遍缩减教学时数和增设课程实验教学的情况,本书共安排了 25 讲内容。每一讲内容都是一个完整的知识点,也保证了教师在一节课的时间内完整地完成一讲的教学任务。同时在精炼内容的基础上,本书能够更好地做到抽丝剥茧,对本门功课的重点知识和基本点知识做到提纲挈领。

第三,本书的内容安排具有系统性和完整性。在保证每一讲内容独立性的基础上,同时注重了各讲内容之间的系统性和整体的完整性。这 25 讲内容涉及到了“通信系统原理”这门课程所有的基本知识点。包括绪论知识、信号与系统预备知识、信道、模拟信号频带传输、模拟信号数字化、数字信号基带传输、数字信号频带传输、最佳传输这几大部分知识。

第四,本书的难度适中偏易。本书舍弃了一些不伤及整体性知识外的繁琐的理论推导过程,直接给出了对读者有用的结论知识,以便于读者理解和掌握这门功课的重点知识。总体上本书知识内容难易程度适中而偏易,便于大中专院校电子信息类师生参考学习。

第五,本书配套的例题、图表、练习题典型而又翔实。本书在内容简练的基础上,为保证对重点知识点的理解和掌握,为相关内容配套了翔实而又典型的例题、图表和练习题。

本书在编写过程中,参考了一些相关的文献,在此对这些文献的著作者表示深深的感谢!

由于作者水平有限,书中难免存在一些缺点和错误,真心恳请各位专家、学者和读者批评指正,联系邮箱:467734197@qq.com。

编者

目 录

第一讲 绪论	1
一、通信与通信系统	1
二、信息的度量	2
三、衡量通信系统的主要性能指标	3
四、“通信系统原理”课程知识概况	4
第二讲 确知信号频域分析	6
一、信号分类	6
二、周期信号频域分析	6
三、非周期信号频域分析	8
四、傅里叶变换的卷积定理及其应用	9
第三讲 确知信号谱密度函数与相关函数	11
一、能量信号和功率信号	11
二、帕塞瓦尔定理	11
三、能量谱密度函数和功率谱密度函数	11
四、互相关函数与自相关函数	13
五、相关函数与谱密度函数之间的关系	14
第四讲 随机过程与平稳随机过程	16
一、随机过程	16
二、随机过程统计特性	16
三、平稳随机过程	17
四、各态历经性	18
五、平稳随机过程自相关函数的性质	18
第五讲 高斯过程和窄带随机过程	21
一、高斯过程	21
二、白噪声过程	21
三、窄带随机过程	22
四、正弦波加窄带高斯过程	23
五、随机过程通过线性系统	24

第六讲 信道及信道容量	27
一、信道及其分类	27
二、通信中的噪声	27
三、恒参信道	27
四、随参信道	28
五、信道容量	29
第七讲 调制概述及模拟线性调制	32
一、调制概述	32
二、常规调幅 AM 的调制与解调	33
三、抑制载波双边带 DSB 调制与解调	36
四、抑制载波单边带调制 SSB 的调制与解调	37
第八讲 模拟线性调制抗噪性能分析	42
一、模拟线性调制系统抗噪性能分析模型	42
二、DSB 调制系统的性能	43
三、SSB 调制系统的性能	44
四、常规调幅包络检波的抗噪声性能	45
第九讲 模拟非线性调制及抗噪性分析	48
一、调相信号和调频信号	48
二、窄带调频与宽带调频	49
三、调频信号的产生	51
四、调频信号的解调	51
五、调频信号的抗噪声性能	52
六、频分复用(FDM)	53
第十讲 模拟信号数字化与抽样	55
一、模拟信号数字化	55
二、自然抽样	56
三、理想抽样	56
第十一讲 量化及非均匀量化	60
一、模拟信号的量化	60
二、均匀量化	61
三、非均匀量化	62
第十二讲 PCM 编码原理	65
一、PCM 量化各段与段间隔	65
二、编码举例	65

三、PCM 的译码	66
四、PCM 信号的码元速率和带宽	66
五、时分复用	66
第十三讲 增量调制(ΔM 调制)	70
一、增量调制的有关概念	70
二、 ΔM 编码原理	70
三、 ΔM 译码原理	71
四、 ΔM 编码噪声	71
五、 ΔM 编码系统的输出信噪比	72
第十四讲 数字基带信号码型和功率谱公式	74
一、数字信号基带传输	74
二、数字基带信号线路码的要求	75
三、数字基带信号的常用码型	75
四、数字基带信号功率谱	77
第十五讲 数字基带传输的码间串扰	80
一、数字基带系统	80
二、基带传输系统的码间串扰	81
三、无码间串扰的基带传输系统	82
四、典型五码间串扰传输	84
第十六讲 时域均衡技术	87
一、均衡技术的提出	87
二、时域均衡的基本原理	87
三、以实际例子讲述时域均衡器的原理	89
第十七讲 部分响应系统	91
一、部分响应系统的提出及思路	91
二、第一类部分响应系统的模型(双二进制系统)	91
三、眼图及其成因	93
第十八讲 二进制数字振幅调制及其性能分析	96
一、二进制数字振幅调制的原理	96
二、2ASK 的解调	96
三、2ASK 信号的功率谱及带宽	97
四、2ASK 系统的抗噪声性能	99
第十九讲 二进制数字频率调制及其性能分析	102
一、二进制数字频率调制的原理	102

二、2FSK 信号的解调	102
三、2FSK 信号的功率谱及带宽	104
四、相干解调 2FSK 系统的抗噪声性能	105
第二十讲 二进制数字相位调制及性能分析	108
一、绝对码与相对码	108
二、二进制相移键控(2PSK 与 2DPSK)	109
三、2PSK 的调制与解调	110
四、2PSK 信号的频谱和带宽	113
五、2PSK 系统的抗噪声性能	114
六、二进制数字调制系统的性能比较	115
第二十一讲 正交调幅(QAM)	116
一、数字多进制调制	116
二、正交调幅信号(16QAM)	116
三、MQAM 的性能分析(与 MPSK 比较)	118
第二十二讲 最佳接收	120
一、数字信号的统计特性	120
二、数字信号的最佳接收	121
第二十三讲 确知数字信号的最佳接收机	124
一、最佳判决准则变形表示	124
二、最佳接收机结构	125
三、确知数字信号最佳接收的误码率	125
四、二进制确知信号的最佳形式	126
第二十四讲 数字信号的匹配滤波接收法	130
一、信噪比分析	130
二、匹配滤波器的传输特性	130
三、匹配滤波器接收电路的构成	132
第二十五讲 最佳基带传输系统	134
一、最佳数字基带传输系统	134
二、设计最佳基带传输系统的方法	134
三、最佳基带传输系统的误码率性能	135
参考答案	138
附录一 本书采用统一符号表示含义	163
附录二 常用傅里叶变换对	164
附录三 常用傅里叶变换性质	165
参考文献	166

第一讲 绪论

一、通信与通信系统

1. 通信的定义

顾名思义,通信包含“通”和“信”两层含义。这里,“通”是动词,指传递、转移过程,不但包含在空间上的转移,也包括在时间上的变化(耗损);“信”是主体,指信息及其表示形式,包括语音、字符、图形等。在实际的传输中要将这些内容转化成为通信设备能够识别的信号形式,如电磁信号、光信号等。同时为了能够将信号(信息)顺利地进行传递,通信应该还包括对信息进行相应的必要处理。

因此,通信就是指信息或其表示方式的时空转移及相应的处理。

2. 通信系统

为完成通信过程所需各个设备组成的系统集成称为通信系统。

(1) 最简通信系统模型如图 1-1 所示。



图 1-1 最简通信系统模型

按照通信信道中传递的信号是模拟信号还是数字信号将通信系统分为模拟通信系统和数字通信系统。上述通信系统也称为基带通信系统。

(2) 基本模拟通信系统模型如图 1-2 所示。

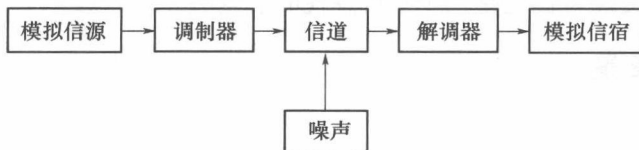


图 1-2 基本模拟通信系统模型

在模拟通信系统中存在两种变换:第一种,将原始信息转变成系统设备能够识别与传递的信号,如图形到电信号,此功能隐含由信源(信宿)模块完成;第二种,将频率很低的原始电信号转化为适合信道传输的较高频率的信号,这个过程称为调制(解调),此功能由调制模块完成。

(3) 基本数字通信系统模型如图 1-3 所示。

信源:可以模拟信源,也可以是数字信源。信源是通信的发起者。

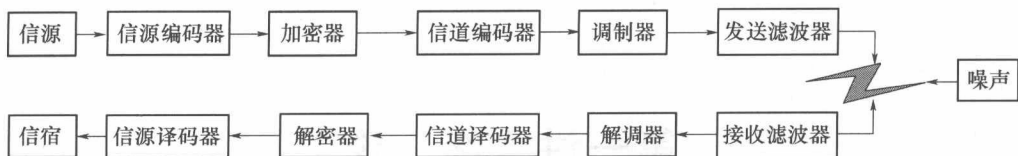


图 1-3 基本数字通信系统模型

信源编码器:当信源为模拟信源时,信源编码器首先要将模拟信号转化为数字信号,再进行去除冗余信息的压缩编码,以提高通信的有效性。当信源是数字信息时,信源编码器直接进行信息压缩编码。信源译码器完成与信源编码器相反的工作。

加密器:为了通信的安全性,在传输之前进行一种数据保密处理。

信道编码器:为了提高通信的可靠性而进行一种编码。

调制器:为了信号适合信道的传输而进行处理。

发送滤波器:数字信号的频率范围在理论上是无限的,发送滤波器将数字信号的频率范围限制在某一个允许的范围,以减小占用的通信信道的频带。

接收滤波器:主要是为了滤除在通信信道中加入的噪声,以减小噪声影响。

注意,在通信系统中,要求信宿收到的信息应该和信源发送的信息尽可能一致,这也是通信的最基本要求。所以,发送端的设备与接收端的设备是对称的,而且完成的工作基本上都是相反的过程。

(4) 数字通信系统较之模拟通信系统的特点。

第一,数字通信系统的抗干扰和失真性能强,尤其当采用中继时,信号可以通过再生而消除噪声积累影响。

第二,便于与计算机技术相结合,利用现代信息处理技术对其进行处理,如在提高可靠性和安全性方面。

第三,数字通信可以传递各种信息,使得通信系统的功能增强。

当然,数字通信的这些优点都是用比模拟通信更宽的带宽换得的。例如:一路模拟电话的带宽只占据 4kHz,而传递一路相同质量的数字信号需要 64kHz 带宽。同时,数字通信系统的同步设备复杂性高也是一个不可忽视的缺点。

二、信息的度量

1. 信息量

我们将信源发送每个符号所含有的有用信息的多少称为信息量,用 I 表示。根据信息论的知识,一个符号 X 信息的多少是通过这个符号发送概率 $P(X)$ 的大小来度量的,具体关系为

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

当 $a=2$ 时,信息量的单位为 bit。

2. 熵

设离散信源 X 是由 n 个符号组成的集合,其中每个符号 X_i 在所传递的消息中出现的

概率为 $P(X_i)$ ，且有 $\sum_i P(X_i) = 1$ ，则包含 X_i 的信息量为 $-\log_2 P(X_i)$ ，而统计平均每个符号包含的信息量称为该信源的熵，用 $H(X)$ 表示。由概率论的知识可知，熵就是一种数学期望。将 X_i 当作随机变量 X 的某次取值， $P(X_i)$ 是取该值时的概率，而 $-\log_2 P(X_i)$ 是 $P(X_i)$ 的函数，则离散型随机变量 X 的函数的数学期望为

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n P(X_i) \log_2 P(X_i) \text{ (bit/符号)} \quad (1-2)$$

当信源的 m 个符号等概率出现时，信源的熵最大，为

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

3. 信息速率

(1) 码元速率 R_B ，表示单位时间内传输码元(符号)个数，单位是 Bd(代表 Baud)。

(2) 信息速率 R_b ，表示单位时间内传输信息量，单位为 bit/s。

两者之间的关系为

$$R_b = R_B H(X) \quad (1-4)$$

三、衡量通信系统的主要性能指标

衡量通信系统的主要性能指标包括有效性和可靠性，只是对于模拟通信系统和数字通信系统两个指标含义不同。

1. 模拟通信系统

有效性:模拟信号的带宽越小,其有效性越高,且信号的带宽一定要小于信道的带宽。

可靠性:用接收端解调器输出的信号与噪声的功率比 $\frac{S_o}{N_o}$ 衡量,比值越大说明可靠性越高。

2. 数字通信系统

(1) 有效性:用频带利用率表示为

$$\eta_B = \frac{R_B}{B_C} \text{ (Bd/Hz)} \quad (1-5)$$

或者是

$$\eta_b = \frac{R_b}{B_C} \text{ (bit/s} \cdot \text{Hz)} \quad (1-6)$$

频带利用率越高表示系统的有效性越好。

(2) 可靠性:用误码率与误比特率表示。

误码率为

$$P_e = \frac{\text{传输中出错的码元数}}{\text{总传输的码元数}}$$

误比特率为

$$P_b = \frac{\text{传输中出错的比特数}}{\text{总传输的比特数}}$$

这两个指标越小说明可靠性越高。

通信系统的这两个指标是一对不可调和的矛盾,当我们追求一个指标时,必须以牺牲另一个指标为代价。例如调频广播与调幅广播,调频广播的音质要远远好于调幅广播,也就是说调频广播的可靠性高于调幅广播;但是调频广播所占用的带宽要远远高于调幅广播,也就是说调频广播的有效性低于调幅广播。因此在实际应用中,要根据需求在两者之间有所取舍。

四、“通信系统原理”课程知识概况

从最原始的信号来讲,信源产生的信号都是模拟信号,相应地信号从信源到信宿传输的模式可以用图 1-4 表示。



图 1-4 信号传输模式

简单地讲,“通信系统原理”这门课程就是讲述信号从信源传输到信宿的完整过程。详细地说,信号在这个传输过程中根据情况和需要有不同的传输方式,同时为了讲清楚传输过程中信号的处理变化就涉及到一些信号的分析过程。一个基本完整的通信过程包含信号分析、信道、模拟频带传输、模拟信号数字化、数字基带传输、数字频带传输、最佳传输这七大模块。本教程也是按照这七大模块来讲述的。

例 1:某信源由 A、B、C、D、E 五个符号组成,设每个符号独立出现,且出现的概率分别为 $\frac{1}{4}$ 、 $\frac{1}{8}$ 、 $\frac{1}{8}$ 、 $\frac{3}{16}$ 、 $\frac{5}{16}$,信源以 1000Bd 速率传输信息,求:

- (1) 传递 1 小时的信息量;
- (2) 传递 1 小时可能达到的最大信息量。

解:(1)信源熵为

$$H(x) = \left(\frac{1}{4} \log_2 4 + \frac{2}{8} \log_2 8 + \frac{3}{16} \log_2 \frac{16}{3} + \frac{5}{16} \log_2 \frac{16}{5} \right) \text{bit/符号} = 2.23 \text{bit/符号}$$

平均信息速率为

$$R_b = R_B H(x) = (1000 \times 2.23) \text{bit/s} = 2.23 \times 10^3 \text{bit/s}$$

1 小时传输的信息量为

$$I = (2.23 \times 10^3 \times 3600) \text{bit} = 8.028 \text{Mbit}$$

(2) 等概率时信源的熵最大,即

$$H_{\max} = (\log_2^5) \text{bit/符号} = 2.322 \text{bit/符号}$$

1 小时传输的最大信息量为

$$I_{\max} = H_{\max} \times 1000 \times 3600 \text{bit} = 8.359 \text{bit}$$

练习题

(1) 如何衡量数字通信系统与模拟通信系统的有效性与可靠性?

(2) 在多进制通信系统中,为什么误比特率小于误码率?试以四进制系统为例进行说明。

(3) 一个由字母 A、B、C、D 组成的字,对于传输的每一个字母用二进制脉冲编码,00 代替 A,01 代替 B,10 代替 C,11 代替 D。每个脉冲宽度为 5ms。

① 不同的字母等概率出现时,试计算传输的平均信息速率;

② 若每个字母出现的概率分别为 $P_A = \frac{1}{5}$ 、 $P_B = \frac{1}{4}$ 、 $P_C = \frac{1}{4}$ 、 $P_D = \frac{3}{10}$,试计算传输的平均信息速率。

第二讲 确知信号频域分析

一、信号分类

根据研究目的不同,可以将信号分为不同的种类,常见的分类有下述几种。

1. 确知信号与随机信号

确知信号是指信号参数是确定值的信号。当把信号用函数表示时,确知信号所对应的函数表达式 $f(t)$ 是确定的时间函数,即对于一个时刻 t 有唯一的函数值 $f(t)$ 与之相对应。随机信号是指无法用确定时间函数表达式表述的信号。对于随机信号,要依靠它的概率特性进行描述。

2. 周期信号和非周期信号

周期信号是指信号波形以一定周期重复出现的信号。相应地,非周期信号是指信号波形不会周期重复出现的信号。因此,随机信号一定是非周期信号。两种不同的信号的频域表达式和特征含义是不同的,而且在进行信号频域分析时也是不一样的。

3. 功率信号与能量信号

功率信号是指平均功率存在的信号;能量信号是指能量存在的信号。具体定义见第三讲。

对于信号的分析包括两个方面:时域分析和频域分析。时域分析是指研究信号 $f(t)$ 和时间 t 之间的性质,比如信号的时延、幅值大小等方面的性质;频域分析是指将信号通过傅里叶变换成频率 f 或角频率 ω 的函数 $F(\omega)$,研究 $F(\omega)$ 与 f 或者 ω 之间的关系,例如信号的频谱分布、信号的带宽等问题。 f 与 ω 之间的关系为 $\omega = 2\pi f$ 。

二、周期信号频域分析

对于周期信号的频域分析包括两个方面:傅里叶级数形式和频谱函数形式。周期为 T_0 的周期信号 $f(t)$ 可以表示成傅里叶级数形式:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n e^{jn\omega_0 t} \quad (2-1)$$

$$F_n = \frac{1}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} f(t) e^{-jn\omega_0 t} dt \quad (2-2)$$

式中: $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$,称为角频率; F_n 称为周期函数 $f(t)$ 傅里叶级数的系数,简称谱系数。该周期函数对应的频谱函数为

$$F(\omega) = 2\pi \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n \delta(\omega - n\omega_0) \quad (2-3)$$

式中: $F(\omega)$ 称为频谱密度函数,简称频谱函数。

例 1: 有下述的周期信号 $f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} D(t - nT_0)$, 且周期 $T_0 = 3\tau$, 如图 2-1 所示。

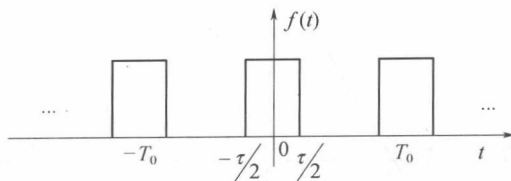


图 2-1 周期方波信号

求该周期函数的傅里叶级数的谱系数和频谱函数。

解: 由式(2-2)可得该周期函数的傅里叶级数的谱系数为

$$\begin{aligned} F_n &= \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} e^{-jn\omega_0 t} dt \\ &= \frac{1}{T_0} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} e^{-jn\omega_0 t} dt \\ &= \frac{A\tau}{T_0} \text{Sa}\left(\frac{n\pi\tau}{T_0}\right) = \frac{\tau}{T_0} \text{Sa}\left(n\omega_0 \frac{\tau}{2}\right) \\ &= \frac{1}{3} \text{Sa}(n\pi/3) \end{aligned}$$

其对应的图形如图 2-2 所示。

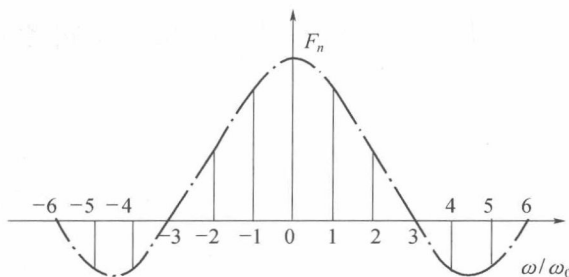


图 2-2 周期方波信号谱系数图形

由上述计算结果和式(2-3)可得该周期函数的频谱函数为

$$F(\omega) = \frac{2\pi}{3} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \text{Sa}\left(\frac{n\pi}{3}\right) \delta(\omega - n\omega_0)$$

其图形如图 2-3 所示。

通过上述分析可以得到如下结论:

(1) 对于同一个周期信号谱系数与其频谱函数虽然非常相似,但本质还是不同的。谱系数是一些离散普通的常量,而频谱函数是由一些离散的冲击函数构成的。

(2) 对于周期函数,不论谱系数还是频谱函数的谱线都是离散的。谱线的间距为

$$\frac{2\pi}{T_0}$$

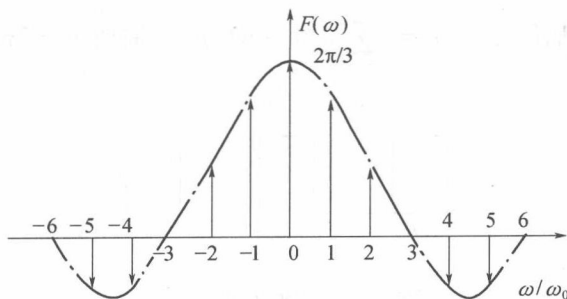


图 2-3 周期方波信号频谱函数图形

三、非周期信号频域分析

对于非周期信号的频域分析就是我们知道的傅里叶变换。我们知道,对于非周期函数 $f(t)$ 存在以下的傅里叶变换对:

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

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2-5)$$

例 2: 求图 2-4 所示的非周期信号 $f(t) = D_{\tau}(t)$ 频谱函数并画出其图形。

解: 根据式(2-4)可得其频谱函数为

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt = \int_{-\tau/2}^{\tau/2} e^{-j\omega t} dt = \tau \text{Sa}\left(\frac{\omega\tau}{2}\right)$$

其图形如图 2-5 所示。

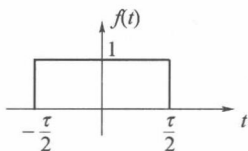


图 2-4 非周期方波信号

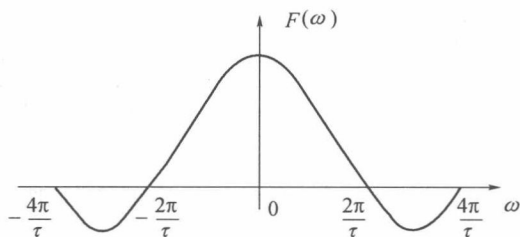


图 2-5 非周期方波信号的频谱函数图形

从上述两个例子可以看出:

- (1) 周期函数的频谱函数是离散谱,非周期函数的频谱图形是连续曲线。
- (2) 周期函数和从其中抽取一个周期所得的非周期函数的频谱函数的轮廓完全一致。
- (3) 对于周期函数的谱系数后和其对应的非周期函数的频谱函数 $F(\omega)$ 之间的关系为

$$F_n = \frac{1}{T_0} F(\omega) \Big|_{\omega = n\omega_0}$$

- (4) 可以简单地将 ω 的取值范围称为信号的带宽,具体关于信号带宽的定义见后面

章节。在图 2-5 中,从频域看方波信号的强度主要集中在 $0 \sim \frac{2\pi}{\tau}$ 范围内,即方波信号功率主要集中在该频谱范围内,所以我们将 $B = \frac{2\pi}{\tau} - 0 = \frac{2\pi}{\tau}$ 称为方波信号的零点带宽。

(5) 在数字基带通信中,一般认为方波脉冲信号为其传输基本波形信号。在图 2-5 中将以 ω 为变量的带宽转化成以 f 为变量的带宽,即 $B = \frac{2\pi}{\tau}$ (rad/s) 变为 $B = \frac{1}{\tau}$ (Hz)。根据码元速率的定义可知 $\frac{1}{\tau}$ 表示单位时间内包含码元的个数,即 $R_B = \frac{1}{\tau}$ 。也就是说,这时在数值上 $R_B = B$,即数字基带通信中码元速率在数值上等于信号的带宽。

四、傅里叶变换的卷积定理及其应用

1. 时域卷积定理及其应用

时域卷积定理的内容:

设 $f_1(t) \leftrightarrow F_1(\omega)$, $f_2(t) \leftrightarrow F_2(\omega)$, 则

$$f_1(t) * f_2(t) \leftrightarrow F_1(\omega) F_2(\omega) \quad (2-6)$$

时域卷积定理的典型应用:其重要应用在系统的分析中,模型如图 2-6 所示。

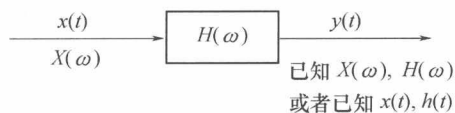


图 2-6 时域卷积定理的典型应用模型

其含义是指设信号 $x(t) \leftrightarrow X(\omega)$ 经过系统为 $h(t) \leftrightarrow H(\omega)$ 后,则输出信号的时间函数为

$$y(t) = F^{-1}[X(\omega)H(\omega)] = x(t) * h(t)$$

这里的应用是指利用上式可以避开求卷积的繁琐过程,通过求傅里叶逆变换方便地求出输出信号的时域函数表达式。或者根据情形自由地选择进行计算。

2. 频域卷积定理及其应用

频域卷积定理的内容:设有 $f_1(t) \leftrightarrow F_1(\omega)$, $f_2(t) \leftrightarrow F_2(\omega)$, 则

$$f_1(t)f_2(t) \leftrightarrow \frac{1}{2\pi}F_1(\omega) * F_2(\omega) \quad (2-7)$$

频域卷积定理的典型应用:其主要应用在调制与解调中,模型如图 2-7 所示。

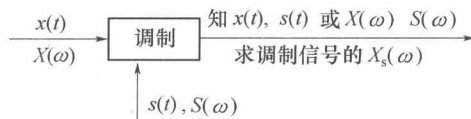


图 2-7 频域卷积定理的典型应用模型

其反映的含义是已知输入调制信号为 $x(t)$ 或 $X(\omega)$, 载波信号为 $s(t)$ 或 $S(\omega)$, 输出信号为 $x_s(t) = x(t) \times s(t)$, 求调制信号的频谱函数。这时可以根据实际情况选择先在时