

成人高等教育教材

100111001101001010001

数据通信原理

SHUJU TONGXIN YUANLI

毛京丽 常永宇
张丽 李文海 编著



1100110100101000

000 ■ 北京邮电大学出版社 ■

数 据 通 信 原 理

毛京丽 常永宇 编 著
张 丽 李文海

北 京 邮 电 大 学 出 版 社

• 北 京 •

内 容 提 要

本书首先介绍了有关信号、调制和噪声方面的基础知识,以作为后续章节的学习基础。

本书的主要内容是在介绍数据通信系统构成及有关基本概念的基础上,对数据信号的基带传输、频带传输和数字数据传输从理论上作了一定的分析和讨论;介绍了差错控制基本理论及应用;本书的后半部分着重讨论了数据通信的交换方式、相关通信协议及分组交换网、帧中继网以及 DDN 等基本构成及应用。

本书可作为通信专业和计算机专业的教学用书,也可供从事数据通信和计算机通信方面工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

数据通信原理/毛京丽等编著. —北京:北京邮电大学出版社,2000.12

ISBN 7-5635-0234-3

I. 数… II. 毛… III. 数据通信-理论 IV. TN919

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 53652 号

数据通信原理

编 著 毛京丽 常永宇
张 丽 李文海
责任编辑 马相平

北京邮电大学出版社出版
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
北京源海印刷厂印刷

*

787×1092 毫米 1/16 印张 15.5 字数 396 千字

2000 年 12 月第 2 版 2000 年 12 月第 1 次印刷

印数:1-7000 册

ISBN 7-5635-0234-3/TN·97 定价:27.00 元

前 言

本书是在倪维桢、高鸿祥所编邮电高函教材“数据通信原理”的基础上进行改编和修订,并增加了部分新的内容。本书主要是面向通信专业和计算机专业本科生教材,也可供从事数据通信和计算机通信方面工作的工程技术人员参考。

本书在内容取材和编写上具有以下几个特点:

1. 在第一章增加了有关信号、调制和噪声方面的基础知识的简单介绍,以有助于本课程的学习;

2. 本教材兼顾了数据通信和计算机通信中的几个主要方面的问题,即传输、交换、协议及数据通信网等,本书侧重加入了分组交换网、帧中继网及 DDN 等方面的内容;

3. 在编写上着重于基本原理分析和实际技术应用两个方面,并力求深入浅出,便于自学。

本书共分七章,第一章和第四章由常永宇编写;第二章和第六章由张丽编写;第三章由李文海编写;第五章和第七章由毛京丽编写。

本书在编写过程中除参阅了 ITU-T 相关建议和电信主管部门有关标准和文件外,还参阅了汪润生等编著的“数据通信工程”,倪维桢主编的“数据通信原理”,赵慧玲等编著的“帧中继技术”等相关书籍。在此对以上作者表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免有不足之处,敬请读者批评指正。

作 者
2000 年 10 月

目 录

第一章 基础知识——信号、噪声和调制	1
第一节 确知信号的时域和频域描述及分析	1
一、信号的分类	1
二、信号的特性	2
三、确知信号的时域特性与频域特性	3
第二节 系统响应及分析	6
一、冲激函数	6
二、系统响应及分析	8
第三节 随机信号的描述及分析方法	10
一、随机过程的一般描述	11
二、随机过程的部分描述——数字特征	12
三、平稳随机过程	14
四、随机过程通过线性系统	18
第四节 噪声及其特性描述	20
一、定义及分类	20
二、散粒噪声	20
三、热噪声	20
四、白噪声	20
五、高斯噪声	21
六、窄带随机过程	22
七、正弦波加窄带高斯噪声	24
第五节 调制理论及调制信号分析	26
一、调制定理	26
二、振幅调制系统	28
小结	34
习题	35
第二章 概论	38
第一节 数据与数据通信	38
第二节 数据通信系统的构成	39
一、数据终端设备	39
二、数据电路	39
三、中央计算机系统	40

第三节 传输代码	40
一、国际 5 号码(IA5)	41
二、国际电报 2 号码(ITA2)	42
三、EBCDIC 码	42
四、信息交换用汉字代码	43
第四节 数据通信系统的主要性能指标	43
一、工作速率	43
二、可靠性质量指标	44
三、有效性质量指标	44
第五节 数据传输方式	45
一、并行传输与串行传输	45
二、异步传输和同步传输	45
三、单工、半双工和全双工传输	46
小结	47
习题	47

第三章 数据信号传输 48

第一节 概述	48
一、数据信号及特性描述	48
二、传输信道及数据信号传输的基本方法	51
三、信道容量的概念	53
第二节 数据信号的基带传输	53
一、基带传输系统构成模型	54
二、理想低通网络波形形成,奈奎斯特第一准则	54
三、具有幅度滚降特性的低通网络波形形成	55
四、部分响应形成系统	57
五、数据序列的扰乱与解扰	60
六、数据传输系统中的时域均衡	61
七、数据传输系统中的时钟同步	63
八、基带传输的最佳化和系统性能分析	64
九、基带数据传输系统及应用	67
第三节 数据信号的频带传输	69
一、频带传输系统	69
二、数字调幅	70
三、数字调相	74
四、数字调频	81
五、频带传输误码性能分析	83
六、数字调制中的载波提取和形成	87
七、格型编码调制(TCM)的概念	89
八、电话网中应用的几种 Modem 标准建议简介	90

第四节 数据信号的数字传输	95
一、数据信号数字传输的概念及特点	95
二、数字数据传输的实现方式	96
三、数字数据的时分复用——TDM	97
四、数字数据传输系统的构成	98
小结	100
习题	100
附录	101
第四章 差错控制	103
第一节 差错控制的基本概念及原理	103
一、差错控制的基本概念	103
二、差错控制的基本原理	106
第二节 检错和纠错的基本概念	107
一、码距与检错和纠错能力	107
二、编码效率	109
三、纠错编码的分类	109
第三节 简单的差错控制编码	110
一、奇偶监督码	110
二、水平奇偶监督码	111
三、二维奇偶监督码	111
第四节 汉明码及线性分组码	112
一、汉明码	112
二、线性分组码	113
第五节 循环码	117
一、循环码的循环特性	117
二、循环码的生成多项式和生成矩阵 G	119
三、循环码的编码方法	121
四、循环码的解码方法	123
第六节 卷积码	125
一、基本概念	126
二、卷积码的图解表示	128
三、卷积码的解码概念	130
小结	131
习题	132
第五章 数据交换	134
第一节 概述	134
一、数据交换的必要性	134
二、数据交换方式	134

第二节 电路交换方式	135
一、电路交换方式的原理	135
二、电路交换的优缺点	136
第三节 报文交换方式	136
一、报文交换方式的原理	136
二、报文交换的优缺点	137
第四节 分组交换方式	137
一、分组交换方式的原理	137
二、分组交换的优缺点	139
三、分组的传输方式	140
四、分组长度的选取	142
第五节 帧方式	144
一、帧方式的概念	144
二、帧方式的类型	144
第六节 几种交换方式的比较	144
小结	145
习题	146

第六章 通信协议 147

第一节 协议分层结构及开放系统互连参考模型	147
一、开放系统互连参考模型(OSI-RM)	147
二、层间通信	149
第二节 物理层协议	151
一、基本概念	151
二、CCITT V. 24/RS-232C 建议	152
三、V. 35 建议	154
四、X 系列建议	155
五、数字网络接口建议 G. 703	157
第三节 数据链路传输控制规程	158
一、基本概念	158
二、基本型传输控制规程	160
三、高级数据链路控制规程(HDLC)	162
第四节 CCITT X. 25 建议	172
一、X. 25 建议概述	172
二、X. 25 数据链路层	173
三、X. 25 分组层	174
第五节 分组装/拆(PAD)相关协议	179
一、PAD 功能	179
二、X. 3 建议	180
三、X. 28 建议	180

四、X. 29 建议	181
第六节 X. 75/X. 32/X. 121 建议	181
一、X. 75 建议	181
二、X. 32 建议	182
三、X. 121 建议	182
小结	183
习题	184
附录	185
第七章 数据通信网	186
第一节 数据通信网概述	186
一、数据通信网的构成	186
二、数据通信网的分类	186
第二节 分组交换网	187
一、分组交换网的构成	187
二、分组交换网的路由选择	189
三、分组交换网的流量控制	193
四、用户终端入网方式	195
五、分组交换网的网间互连	197
第三节 帧中继网(FRN)	201
一、帧中继的基本原理	201
二、帧中继协议	203
三、帧中继网的业务管理	206
四、帧中继的应用	208
五、帧中继网的组成	209
六、帧中继用户接入	212
七、帧中继网(FRN)的网间互连	214
第四节 数字数据网(DDN)	217
一、DDN 的基本概念	217
二、DDN 的网络业务	218
三、DDN 的网络结构	221
四、本地传输系统	224
五、复用及数字交叉连接系统	226
六、局间传输与网同步系统	229
七、DDN 的网络管理系统	231
八、DDN 的网间互连	233
第五节 分组交换网、帧中继网及 DDN 之间的关系	234
一、分组交换网、帧中继网及 DDN 的性能比较	234
二、分组交换网、帧中继网及 DDN 的适用场合	235
三、分组交换网、帧中继网及 DDN 之间的关系	235

小结.....	235
习题.....	237
参考文献.....	238

第一章 基础知识——信号、噪声和调制

第一节 确知信号的时域和频域描述及分析

一、信号的分类

信号是信息的载体,它表现了物理量的变化。信号的数学模型是时间函数,例如 $f(t)$, $v(t)$, $i(t)$ 以及 $f(k)$, $x(k)$ 等。我们常常把信号与函数通用。数据通信中传输的对象是电信号,非电信号通过一定形式的转换便可成为电信号。

信号从不同的角度可以简单划分为确知信号和随机信号;周期信号和非周期信号;连续信号和离散信号。

1. 确知信号和随机信号

确知信号可以用确定的时间函数来描述。给定一个特定时刻,就有它相应确定的函数值。例如,有一衰减的指数函数,其表示式为 $f(t) = Ke^{-\alpha t}$, $t \geq 0$ 。现特定 $t=1$ 时,它的相应函数值应为 $f(1) = Ke^{-1} = 0.368K$,这意味着若在 $t=0$ 时刻研究信号,可以确知经过 1 个单位时刻信号就衰减至 $f(0)(=K)$ 值的 36.8%。

随机信号不能给出确定的时间函数,对于特定时刻不能给出确切的函数值,只能用概率统计的方法来描述。通信系统中传输的信号,一般情况下都是随机信号。因为含有信息的信号通常都具有不可预知的不确定性。如果通信系统传输的都是确定性信号,人们就得不到任何新的信息。

但随机信号有时也可以当作确知信号加以分析,例如数据信号中常用的二进制代码,虽然二进制代码本身是随机的,但其中单个的 1 码或 0 码,都可以把它看作确知信号。因此研究确知信号有着重要的意义。

2. 周期信号和非周期信号

周期信号可以定义为

$$f(t) = f(t \pm nT) \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

即信号 $f(t)$ 按一定的时间间隔 T 周而复始、无始无终的变化。式中 T 称为周期信号 $f(t)$ 的周期。显然这种信号实际上是不存在的,所以周期信号只能是在一定时间内按照某一规律重复变化的信号。

非周期信号不具有周而复始的特性,假如周期信号的周期 T 值趋向无限大时,它就变成非周期信号了。非周期信号从存在的时域来观察,又可分为时限信号和非时限信号,例如指数函数 $f(t) = e^{-\alpha t}$, $t \geq 0$ 是一个非时限信号。显然非时限信号存在于一个无界的时域内,而时限信号则存在于一个有界的时域内,例如有一方脉冲信号,其表示式为

$$f(t) = \begin{cases} 2 & |t| \leq 3 \\ 0 & |t| > 3 \end{cases}$$

其函数只在一定范围内有定义。

3. 连续信号和离散信号

连续时间信号是对于每个实数 t (有限个间断点除外) 都有定义的函数。连续时间信号的幅值可以是连续的, 也可以是离散的 (信号含有不连续的间断点属于此类), 如图 1-1 中 (a) 所示为幅值连续的连续时间信号, (b) 所示为幅值离散的连续时间信号。

对于时间和幅值都为连续的信号又称为模拟信号。

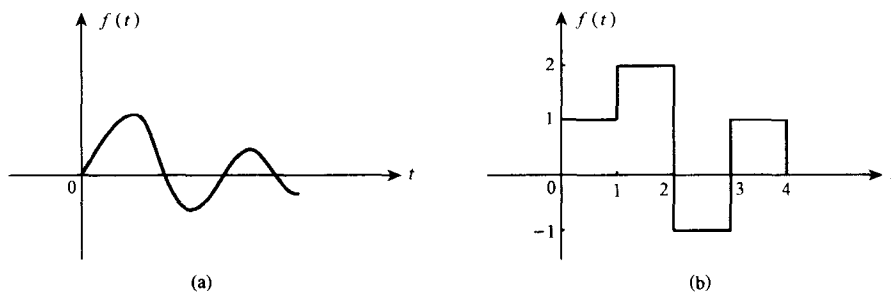


图 1-1 连续时间信号

离散时间信号是指对每个整数 n 有定义的函数, 如果 n 表示离散时间, 则称函数 $f(n)$ 为离散时间信号或称离散序列。如果离散时间信号的幅值是连续的模拟量, 则称该信号为抽样信号。因为抽样信号的幅值仍然为连续信号的相应时刻的幅度, 它可能有无穷多个值, 难以编成数字码, 所以对抽样信号的幅值应按四舍五入的原则进行分等级量化, 从而得到数字信号, 图 1-2 给出了抽样信号和数字信号。

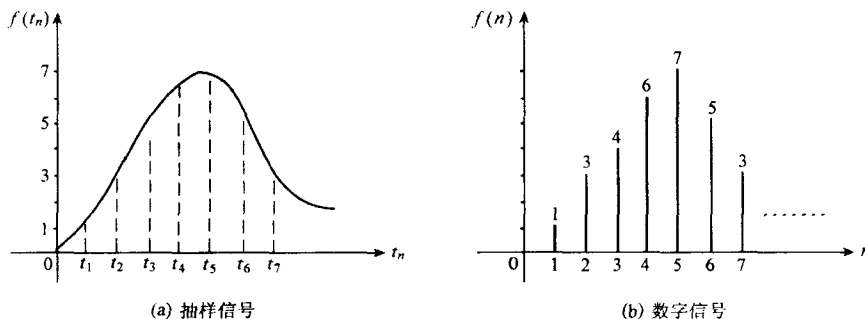


图 1-2 离散时间信号

图 1-2(a) 中 $f(t_n)$ 是抽样序列, 观察在抽样点 $t_n=0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7$ 的函数值, $f(t_n) = 0, 0.9, 2.8, 4.2, 6.3, 6.9, 5.2, 9$ 。对 $f(t_n)$ 按 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 共 8 个等级进行量化, 得到数字信号 $f(n)$ 如图 1-2(b) 所示。图中 $f(n) = \{0, 1, 3, 4, 6, 7, 5, 3, \dots\}$, 这时可以采用三位二进制数码表示有限个量值。

二、信号的特性

信号的特性表现为它的时间特性和频率特性。

信号的时间特性主要指信号随时间变化的特性, 即信号同一形状的波形重复出现周期的长短, 在一个周期内信号变化的速率以及相应的振幅。信号随时间变化的这些表现包含了信号的全部信息量。

信号的频率特性可用信号的频谱函数来表示。所谓频谱函数, 即可看成是表征信号的各项

率成分,以及各频率成分的振幅和相位。在频谱函数中,包含了信号的全部信息量。

信号的频率特性和时间特性都包含了信号带有的信息量,也能表示出信号的特点,所以信号的频率特性和时间特性之间,必然有密切的联系。

三、确知信号的时域特性与频域特性

对于确知信号和随机信号都可用它们的时域特性和频域特性表示。时域特性表示信号电压或电流随时间的变化关系。所谓频域特性即任意信号总可以表示为许多不同频率正弦分量的线性组合。这些正弦分量的参数(振幅、频率、初相)的规律,我们称之为该信号的频谱。例如设有一个信号为

$$f(t) = \sin \omega_1 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_1 t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_1 t \quad (1-1)$$

式中 $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$, 信号 $f(t)$ 波形和频谱如图 1-3 所示。

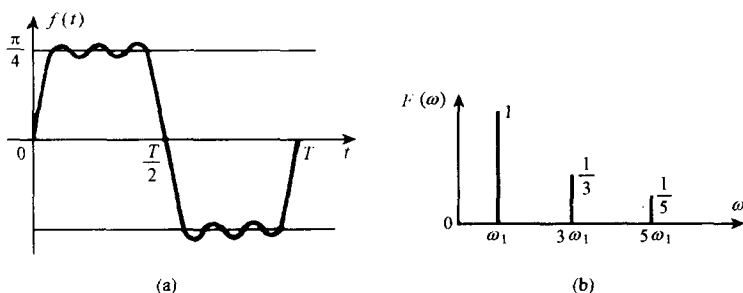


图 1-3 信号波形及其频谱图

其中每一条谱线代表一个正弦分量,谱线的高度代表这一正弦分量的振幅,谱线的位置代表这一正弦分量的角频率。

根据傅立叶变换的原理,任何一个周期信号,若满足狄里赫利条件,都可表示为傅立叶级数,即如果 $f(t) = f(t + mT)$ 则有

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega t - \varphi_n) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega t) \quad (1-2)$$

这里 $\omega = \frac{2\pi}{T}$ 称基波角频率,所以对周期信号而言,其频谱由离散的频率成分组成,其中的系数可由下式求得

$$A_0 = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} f(t) dt \quad (1-3)$$

$$a_n = A_n \cos \varphi_n = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} f(t) \cos(n\omega t) dt \quad (1-4)$$

$$b_n = A_n \sin \varphi_n = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} f(t) \sin(n\omega t) dt \quad (1-5)$$

并且可知若 $f(t)$ 为奇函数,则 $a_n = 0$, 若 $f(t)$ 为偶函数,则 $b_n = 0$ 。

例如, $f(t)$ 如图 1-4 所示,求其频谱。

由于 $f(t)$ 是偶函数,故有 $b_n = 0$, 且求得 $A_0 = 0$, 有

$$a_n = \frac{4}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} f(t) \cos(n\omega t) dt = \frac{4\omega}{2\pi} \int_0^{\frac{T}{2}} f(t) \cos(n\omega t) dt = \frac{4}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right)$$

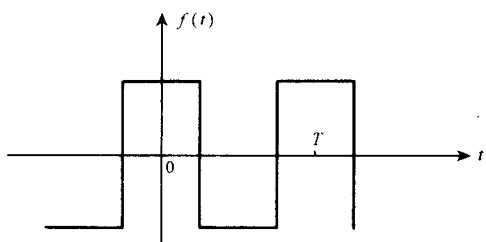


图 1-4 $f(t)$ 波形图

故有 $a_1 = \frac{4}{\pi}, a_2 = 0, a_3 = -\frac{4}{3\pi}, a_4 = 0 \dots$

则 $f(t) = \frac{4}{\pi} \left(\cos \omega t - \frac{1}{3} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \dots \right)$

可作出 $f(t)$ 的幅频、相频特性(略), 所以周期信号得到的是离散频谱。为了计算方便, 常将傅立叶级数

表示成指数形式, 由于 $\cos x = \frac{e^{jx} + e^{-jx}}{2}$, 所以

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega t - \varphi_n) \\ &= \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{e^{j(n\omega t - \varphi_n)} + e^{-j(n\omega t - \varphi_n)}}{2} \\ &= \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{2} e^{-j\varphi_n} e^{jn\omega t} + \sum_{n=-1}^{-\infty} \frac{A_{-n}}{2} e^{j\varphi_{-n}} e^{jn\omega t} \end{aligned} \quad (1-6)$$

上式中

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} = A_{-n} \quad (1-7)$$

$$\varphi_{-n} = \arctan \frac{b_n}{a_n} = -\varphi_n \quad (1-8)$$

将式(1-7), 式(1-8)代入式(1-6)中有

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{2} e^{-j\varphi_n} e^{jn\omega t} + \sum_{n=-1}^{-\infty} \frac{A_n}{2} e^{-j\varphi_n} e^{jn\omega t} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{A_n}{2} e^{-j\varphi_n} e^{jn\omega t}$$

这里定义 $\dot{A}_n = A_n e^{-j\varphi_n}$ 叫复振幅, 且由上列关系可得出

$$\dot{A}_n = A_n \cos \varphi_n - j A_n \sin \varphi_n = a_n - j b_n \quad (1-9)$$

这样函数 $f(t)$ 可表示

$$f(t) = \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \dot{A}_n e^{jn\omega t} \quad (1-10)$$

其系数 $\dot{A}_n$ 可用下式表示

$$\dot{A}_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{-jn\omega t} dt \quad (1-11)$$

例 1-1 设函数 $f(t)$ 波形如图 1-5 所示, 求该信号的频谱。

$$\begin{aligned} \dot{A}_n &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} f(t) e^{-jn\omega t} dt = \frac{2}{T} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} e^{-jn\omega t} dt = \frac{2}{T} \frac{e^{-j\frac{n\omega\tau}{2}} - e^{j\frac{n\omega\tau}{2}}}{-jn\omega} \\ &= \frac{4}{T} \frac{\sin \frac{n\omega\tau}{2}}{n\omega} = \frac{2\tau}{T} \frac{\sin \frac{n\omega\tau}{2}}{\frac{n\omega\tau}{2}} = \frac{2\tau}{T} Sa\left(\frac{n\omega\tau}{2}\right) \end{aligned}$$

式中 $Sa(x)$ 称为抽样函数, 作出该函数的频谱如图 1-6 所示。

由上例可知, 周期脉冲序列得到离散的频谱, 其谱线的间隔为基波角频率 $\omega = \frac{2\pi}{T}$, 且谱线的间隔随 T 的减少而增大, 反之谱线则随 T 的增大而变密。当 $\omega = \frac{2n\pi}{\tau}$ 时, 相应的频率分量幅值为零, 称为零点。由上例可知, 其零点 $\omega = 2\pi/\tau$ 的值随 τ 的减少而增大, 即脉冲越窄, 第一个零点的值越大。

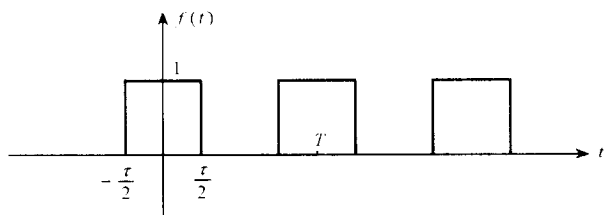


图 1-5 $f(t)$ 波形图

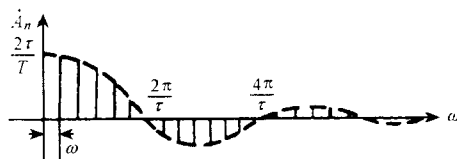


图 1-6 $f(t)$ 的频谱图

对非周期信号 $f(t)$ 来说,我们可看成 $T \rightarrow \infty$ 时的周期函数,故用同样的办法求得其频谱,但由于 $T \rightarrow \infty$ 必有 $\omega = \frac{2\pi}{T} \rightarrow 0$,离散的谱线变成了无限密集连续频谱,所以我们说对非周期信号来说,其频谱将是连续的频谱,则傅立叶级数就变成了傅立叶积分,可表示为

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (1-12)$$

其中

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (1-13)$$

称为信号 $f(t)$ 的频谱密度函数,简称频谱函数,它表示 $f(t)$ 在 ω 处单位频带(赫)内的频谱值。

习惯上把由 $f(t)$ 确定 $F(\omega)$ 的变换称为傅氏正变换(简称傅氏变换),记为

$$F(\omega) = \mathcal{F}\{f(t)\}$$

相反的由 $F(\omega)$ 确定 $f(t)$ 的变换称为傅氏反变换,并记为

$$f(t) = \mathcal{F}^{-1}\{F(\omega)\}$$

由于 $f(t)$ 与 $F(\omega)$ 彼此互为傅氏反变换和傅氏正变换关系,通常称它们为傅氏变换对,并表示为

$$f(t) \leftrightarrow F(\omega)$$

频谱函数 $F(\omega)$ 一般是一个复函数,可以记作

$$F(\omega) = |F(\omega)| e^{j\varphi(\omega)}$$

其中 $|F(\omega)|$ 是 $F(\omega)$ 的模,它表示信号中各频率分量的相对大小; $\varphi(\omega)$ 是 $F(\omega)$ 的幅角部分,它表示信号中各频率分量的相位关系。为了直观地表示信号的频谱密度,通常把 $|F(\omega)|$ 和 $\varphi(\omega)$ 画成曲线。习惯上也把 $|F(\omega)| \sim \omega$ 与 $\varphi(\omega) \sim \omega$ 曲线分别称为振幅频谱图和相位频谱图。一般而言,若信号 $f(t)$ 满足绝对可积条件,即满足

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)| dt < \infty \quad (1-14)$$

则它的傅氏变换一定存在。不过有些信号尽管不满足这个条件,它们的傅氏变换也存在,因此,绝对可积仅仅是傅氏变换存在的充分条件,而不是必要条件。

例 1-2 试求图 1-7(a) 中所示的矩形脉冲的傅氏变换,并画出它的频谱图。

解 由图可知,矩形脉冲 $f(t)$ 可表示为

$$f(t) = \begin{cases} A & -\tau/2 < t < \tau/2 \\ 0 & \text{其他 } t \end{cases} \quad (1-15)$$

利用式(1-13),可求得 $f(t)$ 的傅氏变换为

$$\begin{aligned}
 F(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt = \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} Ae^{-j\omega t} dt = \frac{A}{j\omega} (e^{j\omega\frac{\tau}{2}} - e^{-j\omega\frac{\tau}{2}}) \\
 &= A\tau \frac{\sin(\omega\tau/2)}{\omega\tau/2} = A\tau \text{Sa}\left(\frac{\omega\tau}{2}\right)
 \end{aligned} \quad (1-16)$$

由于 $F(\omega)$ 在这里是实函数, 所以可以用 $F(\omega)$ 曲线同时表示振幅频谱和相位频谱, 如图 1-7 (b) 所示。

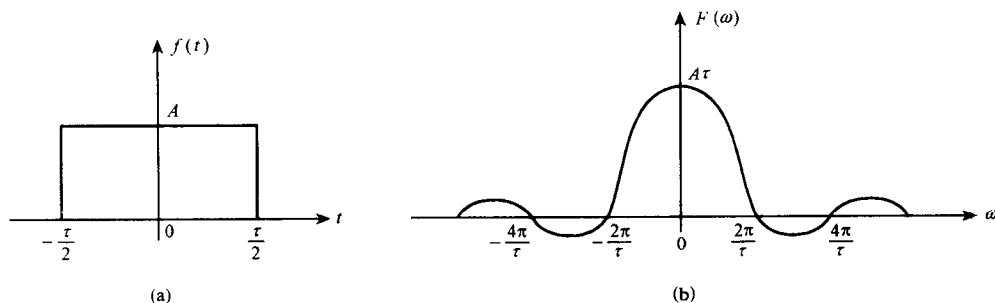


图 1-7 矩形脉冲和它的频谱

由上面所得到的结果可知, 矩形信号的频谱按 $\text{Sa}\left(\frac{\omega\tau}{2}\right)$ 的规律变化, 连续地分布在无限宽的频率范围上。但是由图 1-7(b) 中可见, 它的主要能量处于 $f=0 \sim \frac{1}{\tau}$ 的范围内。因而, 通常认为它的频带宽度 B 近似为 $\frac{1}{\tau}$, 即

$$B \approx \frac{1}{\tau} \quad (1-17)$$

式(1-12)与式(1-13)表明, 信号的时域表示式与它的频谱之间有着完全确定的关系。在通信系统中, 常常要对信号做一些处理, 例如在时域内将信号进行延时, 在频域中将信号的频谱进行搬移等。由于上面所提到的时域和频域间的关系, 在某个域中的处理必然会导致另一个域中特性的相应变化, 在分析这些变化关系方面, 傅氏变换的一些基本性质或定理是非常有用的, 这些性质及它们的证明在《信号分析》等课程中已作了详细介绍, 这里不再赘述。

第二节 系统响应及分析

一、冲激函数

1. 单位冲激信号

在通信系统的分析研究中, 冲激函数具有极重要的作用。单位冲激信号就是时域内的单位冲激函数, 它的定义为

$$\delta(t - t_0) = \begin{cases} \infty & t = t_0 \\ 0 & \text{其他 } t \end{cases} \quad (1-18)$$

并且有

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - t_0) dt = 1 \quad (1-19)$$

因此,单位冲激信号 $\delta(t-t_0)$ 是这样—个信号:它在 $t=t_0$ 瞬间的值为无限大,在其他瞬间的值均为零,而且它所覆盖的面积(通常称为冲激强度)等于 1。

单位冲激信号具有许多重要性质。例如,当 $\delta(t-t_0)$ 与另一信号 $f(t)$ 相乘时,由于它在除 $t=t_0$ 以外的其他瞬间都等于零。因此有

$$f(t)\delta(t-t_0) = f(t_0)\delta(t-t_0) \quad (1-20)$$

并且有

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t)\delta(t-t_0)dt = \int_{-\infty}^{\infty} f(t_0)\delta(t-t_0)dt = f(t_0)\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t-t_0)dt = f(t_0) \quad (1-21)$$

式(1-20)表明:信号 $f(t)$ 与单位冲激信号 $\delta(t-t_0)$ 的乘积仍然是一个冲激信号,但是其强度等于该信号在单位冲激信号所在瞬间的值。上述性质就是所谓抽样性。

利用抽样性质,很容易求得单位冲激信号的频谱函数为

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t)e^{-j\omega t}dt = e^{-j\omega t}|_{t=0} = 1 \quad (1-22)$$

即有

$$\delta(t) \leftrightarrow 1 \quad (1-23)$$

上述结果表明:单位冲激信号 $\delta(t)$ 的频谱等于常数 1,如图 1-8(b)中所示,这意味着在整个频率范围内频谱是均匀分布的。同理可得

$$\delta(t-t_0) \leftrightarrow e^{-j\omega t_0} \quad (1-24)$$

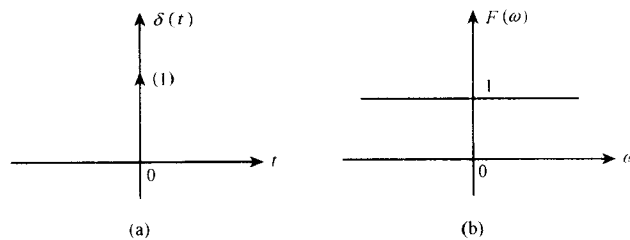


图 1-8 单位冲激信号 $\delta(t)$ 和它的频谱

2. 频域冲激函数

显然,频域单位冲激函数 $\delta(\omega-\omega_0)$ 的定义为

$$\delta(\omega-\omega_0) = \begin{cases} \infty & \omega = \omega_0 \\ 0 & \text{其他 } \omega \end{cases} \quad (1-25)$$

并且有

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(\omega-\omega_0)d\omega = 1 \quad (1-26)$$

利用傅氏变换的对偶性质,由式(1-23)可直接得出

$$1 \leftrightarrow 2\pi\delta(\omega) \quad (1-27)$$

上述关系表明:频域内位于零频率处强度为 2π 的冲激函数对应于时域内的常数 1。换言之,即数值为 1 的直流信号的傅氏变换是频域内位于 $\omega=0$ 处、强度为 2π 的冲激函数,如图 1-9 中所示。

同理,对式(1-24)运用对偶性质,可得

$$e^{j\omega_c t} \leftrightarrow 2\pi\delta(\omega-\omega_c) \quad (1-28)$$

即角频率 ω_c 为的复指数信号 $e^{j\omega_c t}$ 对应于频域内 $\omega=\omega_c$ 处、强度为 2π 的冲激函数。