

—普通高等院校—

电子信息类系列教材

Shuzi Xinhao
Chuli

数字信号 处理

© 张立材 王民 编著



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

TN911.72/48=2

2008

普通高等院校电子信息类系列教材

数字信号处理

张立材 王民 编著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (CIP) 数据

数字信号处理/张立材, 王民编著. —北京: 人民邮电出版社, 2008. 4
(普通高等院校电子信息类系列教材)

ISBN 978-7-115-17378-2

I. 数… II. ①张… ②王… III. 数字信号—信号处理—高等学校—教材 IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 196424 号

内 容 提 要

本书内容比较全面地反映了数字信号处理基础理论发展概貌, 在介绍差分方程、 z 变换、DFT、数字滤波器结构、系统函数、频率响应、频谱等概念后, 详细介绍了 DFT 在频谱分析和卷积等信号处理领域的应用, 以及经典 IIR 和 FIR 数字滤波器的设计理论和方法, 并引进了余弦变换、Haar 变换等新理论方法, 以及滤波器实现结构的可计算性、优先图的概念和方法等。每章最后附有小结、思考练习题与习题, 并对部分经典习题的内容进行了更新。书中引进了科学计算工具软件 MATLAB 的信号处理函数, 并结合一些典型习题提供了部分 MATLAB 求解程序及其运行结果。

本书可作为高等学校电子、通信、信息类及相关专业本科生和非信息类专业研究生的教材或参考书, 也可作为从事数字信号处理的工程技术人员学习参考。

普通高等院校电子信息类系列教材

数字信号处理

-
- ◆ 编 著 张立材 王 民
责任编辑 蒋 亮
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
三河市海波印务有限公司印刷
新华书店总店北京发行所经销
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 22
字数: 532 千字 2008 年 4 月第 1 版
印数: 1-3 000 册 2008 年 4 月河北第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-17378-2/TN

定价: 34.00 元

读者服务热线: (010) 67170985 印装质量热线: (010) 67129223
反盗版热线: (010) 67171154

前 言

随着信息科学和计算技术的迅速发展,数字信号处理理论与应用得到了飞速发展,逐渐成为一门极其重要的学科。数字信号处理理论与应用,已经成为大专院校相关专业的一门必修课程,这也极大地促进了教学辅助工具和软件的发展,反过来也对该学科的教学提出了新的要求。本书突出基本原理、基本概念与基本分析方法的介绍,力求分析、叙述问题条理清楚,逻辑性强,语言深入浅出,并借鉴国内外先进教材,引进了新内容和新分析方法。

为满足国家无线电技术与信息系统教材编委会制定的教学大纲的要求,以及篇幅的限制,教材内容选取坚持少而精的原则。为此本书在教学内容上作了如下安排:傅里叶变换和 z 变换等成熟的信号处理理论,教学重点仍是其物理概念和定义;离散傅里叶变换(DFT)的计算问题,突出了快速傅里叶变换(FFT)基本算法原理和使用方法,不拘泥于各种FFT算法的讨论;对于数字滤波器,重点放在设计原理与方法上,并从实际应用出发,引入MATLAB进行设计与分析;对于数字信号处理系统实现中的有限字长和量化效应等,只作概念性的介绍,以方便读者建立清晰的物理概念,能在遇到实际问题时知道问题的解决之道。

对于新内容和新分析方法的引进,选材主要基于应用广泛的技术和理论。例如,近几年广泛应用于通信与信号处理领域的多采样率数字信号处理,在图像处理技术中占有重要角色的余弦变换和Haar变换等。滤波器设计增加了微分器、希尔伯特变换器、陷波器、谐振器及振荡器等。增加用软件实现各种网络结构的方法,以及与之相关的可计算性、优先图等概念和方法。

为使有关信号处理的理论更便利地应用于实践,本书主要内容都与当前最优秀的科学计算工具软件MATLAB进行有机的结合,使得一些很难理解的抽象理论得到直观演示解释,解决了各种复杂问题的分析与计算等难题。与此同时,作者努力使复杂的数字信号处理变成学生易接受、易实现的简单问题,避免书中MATLAB喧宾夺主的现象。

数字信号处理是一门理论和实际密切结合的课程,为此本书辑录了数量较大的课后练习题。但作者不鼓励读者陷入题海战术,建议读者在学习过程中,首先深刻理解理论,再分析和求解有代表性的问题。用MATLAB在计算机上进行分析问题和求解问题,可以提高学生分析、解决问题的能力,提高学生数字信号处理的理论水平。

全书共分10章。第1章介绍信号处理的概念;第2章是数字信号处理的理论基础,主要叙述时域离散信号与系统时域分析和变换域分析的基本理论;第3章介绍离散傅里叶变换及其快速算法和应用,余弦变换和Haar变换,以及DFT应用等;第4章讨论模拟信号数字化处理的基本原理和方法;第5章主要介绍数字信号处理系统的结构,滤波器的概念以及一些特殊滤波器的概念和特点;第6章以模拟滤波器设计原理为基础,介绍IIR数字滤波器的设计方法;第7章介绍FIR数字滤波器的主要特点和设计方法;第8章介绍多采样率数字信号处理的基本原理、采样率变换系统的实现方法和高效实现网络结构等;第9章主要讨论数字信号处理中的算法实现及实现中涉及的问题。

本书的先修课程是工程数学、信号与系统、数字电子技术、微机原理等。本书不要求学生学习过 MATLAB 程序设计语言，但如果有 MATLAB 程序设计语言基础，则更有利于理解本书的内容。

本书参考教学时数为 60 课时。如果已先修信号与系统课程，建议不讲第 1 章和第 2 章，教学时数减少到 40 课时左右。如果课时数紧张，则第 8 章中多相滤波器结构和采样率转换系统的多级实现可不讲。对相关专业大专层次学生，可只讲前 8 章，参考学时数为 60 学时。

本书由张立材、王民主编，第 1, 2, 4, 8 章由张立材编写，第 3, 5 章由王民编写，第 6 章由王稚慧编写，第 7 章由王燕妮编写，第 9 章由董颖娣编写，各章习题由王稚慧编写；参与本书编写的还有要趁红、刘彤、郭彩龙、孙丽娟、司开波、张晓彤等，在此表示衷心的感谢。

本书是西安建筑科技大学教材建设立项支持项目。西安建筑科技大学王慧琴博士在本书立项及教材内容的取舍、结构设计、章节安排和表达等方面提出许多宝贵的意见，在此表示衷心的感谢！

由于作者水平所限，书中难免有不足和错误，欢迎广大读者指正。欢迎读者反馈宝贵建议和意见，交流教学体会和经验，以便不断修正错误，去粗取精，使本教材进一步完善和提高。

编 者
于西安建筑科技大学

目 录

第 1 章 离散时间信号与系统	1
1.1 信号和信号处理	1
1.1.1 信号的特征与分类	2
1.1.2 典型的信号处理运算	3
1.2 离散时间信号	11
1.2.1 时域离散信号的表示方法	11
1.2.2 典型时域离散信号	13
1.2.3 周期性序列	15
1.2.4 序列的时域运算	18
1.2.5 任意序列的单位脉冲序列表示	23
1.3 时域离散系统	23
1.3.1 线性时不变系统	24
1.3.2 线性时不变离散系统输出与输入的关系	26
1.3.3 线性非时不变离散系统的因果性和稳定性	29
1.4 常系数线性差分方程	33
1.4.1 N 阶线性时不变系统的差分方程描述	33
1.4.2 线性常系数差分方程的递推解法	34
1.4.3 用 MATLAB 求解差分方程	37
1.5 小结	38
思考练习题	39
习题	39
第 2 章 时域离散信号的傅里叶变换与 z 变换	42
2.1 时域离散信号的傅里叶变换	42
2.1.1 时域离散信号的傅里叶变换的定义	43
2.1.2 周期信号的离散傅里叶级数	43
2.1.3 周期信号的傅里叶变换表示	45
2.1.4 序列傅里叶变换的性质	48
2.1.5 时域离散信号傅里叶变换的对称性	50
2.2 时域离散信号的 z 变换	54
2.2.1 z 变换的定义	54
2.2.2 z 变换的收敛域	55
2.2.3 序列 z 变换与其傅里叶变换之间的关系	55
2.2.4 逆 z 变换	60
2.2.5 z 变换的性质	65

2.3 时域离散系统的系统函数与系统频率特性	73
2.3.1 系统的传输函数与系统函数	73
2.3.2 利用系统函数分析系统的因果稳定性	74
2.3.3 用 z 变换计算系统的输出响应	77
2.3.4 根据系统函数的零极点分布分析系统的频率特性	81
2.4 时域离散信号 z 变换与拉普拉斯变换、傅里叶变换的关系	86
2.5 小结	88
思考练习题	89
习题	90
第3章 离散傅里叶变换	96
3.1 离散傅里叶变换的定义	96
3.1.1 DFT 定义	96
3.1.2 DFT 与 FT, ZT, DFS 的关系	97
3.2 离散傅里叶变换的性质	98
3.3 频率域采样	105
3.4 快速傅里叶变换	107
3.4.1 直接计算 DFT 的问题及改进的途径	107
3.4.2 DIT 基 2FFT 算法	108
3.4.3 DIF 基 2FFT 算法	115
3.4.4 离散傅里叶反变换的快速计算方法	118
3.5 离散余弦变换	119
3.5.1 DCT 定义	119
3.5.2 DCT 性质	120
3.5.3 DCT 计算	121
3.6 Haar 变换	122
3.6.1 Haar 变换定义	122
3.6.2 Haar 变换的性质	123
3.7 线性调频 z 变换 (Chirp- z 变换) 算法	124
3.7.1 定义	124
3.7.2 利用 FFT 计算 CTZ	125
3.8 DFT 的应用举例	127
3.8.1 用 DFT 计算线性卷积	128
3.8.2 用 DFT 对信号进行谱分析	131
3.9 小结	131
思考练习题	133
习题	135
第4章 模拟信号数字化处理方法	141
4.1 时域采样	141
4.1.1 采样在频域中的效应	142

4.1.2 带通信号的采样	145
4.1.3 模拟信号的恢复	146
4.2 利用 DFT 作模拟信号的频谱分析	148
4.2.1 谱分析的误差	148
4.2.2 周期信号的谱分析	151
4.3 小结	152
思考练习题	153
习题	153
第 5 章 数字滤波器的状态变量分析法与结构	155
5.1 数字滤波器的基本概念	155
5.2 状态变量分析法	156
5.2.1 状态方程与输出方程	156
5.2.2 状态方程的 z 变换分析	160
5.3 时域离散系统的实现	161
5.3.1 系统分类	161
5.3.2 系统结构的信号流图表示	162
5.4 无限脉冲响应系统的基本结构	163
5.4.1 IIR 直接型	164
5.4.2 IIR 转置型	165
5.4.3 IIR 级联型	166
5.4.4 IIR 并联型	167
5.5 有限脉冲响应系统的基本结构	168
5.5.1 FIR 直接型	168
5.5.2 FIR 级联型	169
5.5.3 FIR 线性相位型	170
5.5.4 FIR 频域采样型	171
5.6 格型网络系统	177
5.6.1 全零点 (FIR) 型	177
5.6.2 全极点 (IIR) 型	179
5.6.3 零、极点 (IIR) 型	180
5.7 特殊滤波器	182
5.7.1 全通滤波器	182
5.7.2 数字谐振器	183
5.7.3 数字陷波器	185
5.7.4 最小相位滤波器	186
5.7.5 梳状滤波器	188
5.7.6 正弦波发生器	189
5.7.7 数字信号处理系统结构的计算复杂度	190
5.8 小结	190

思考练习题	192
习题	192
第6章 无限脉冲响应数字滤波器的设计	195
6.1 常用模拟滤波器及其设计	195
6.1.1 数字滤波器分类	196
6.1.2 模拟滤波器技术指标	197
6.1.3 巴特沃斯低通滤波器设计	199
6.1.4 切比雪夫滤波器设计	207
6.1.5 椭圆滤波器设计	214
6.1.6 贝塞尔滤波器设计	216
6.1.7 常用模拟滤波器的比较	217
6.1.8 模拟滤波器频率变换	217
6.2 IIR 数字滤波器设计	224
6.2.1 脉冲响应不变法	224
6.2.2 双线性变换法	230
6.2.3 低通、高通、带通及带阻 IIR 数字滤波器的设计	237
6.2.4 IIR 数字滤波器的频率变换	243
6.2.5 频域最优设计	245
6.2.6 时域最小平方误差设计	248
6.3 小结	251
思考练习题	251
习题	252
第7章 有限脉冲响应数字滤波器的设计	256
7.1 线性 FIRDF 的特点	256
7.1.1 FIRDF 线性相位条件	257
7.1.2 FIRDF 幅度特性	258
7.1.3 FIRDF 零点特性	263
7.2 窗函数法设计 FIRDF	263
7.2.1 FIRDF 窗函数设计方法	263
7.2.2 常用窗函数	266
7.2.3 用窗函数法设计 FIRDF 的 MATLAB 设计函数	271
7.3 频率采样法设计 FIRDF	277
7.3.1 基本原理	277
7.3.2 用频率采样法设计线性相位滤波器的条件	278
7.3.3 逼近误差及其改进措施	279
7.4 等波纹最佳逼近设计法	285
7.4.1 等波纹最佳逼近基本原理	286
7.4.2 remez 函数和 remezord 函数及应用	289
7.4.3 FIR 数字微分器设计	290

7.4.4 FIR 希尔伯特变换器设计	291
7.5 IIR 和 FIR 数字滤波器的比较	292
小结	293
思考练习题	294
习题	296
第 8 章 多采样率数字信号处理	301
8.1 多采样率数字信号处理的工程需求	301
8.2 按整数因子 D 抽取和按整数因子 I 内插	302
8.2.1 按整数因子 D 抽取	302
8.2.2 按整数因子 I 内插	304
8.3 按有理数因子 I/D 的采样率转换	306
8.4 多采样率转换滤波器的设计	307
8.4.1 直接型 FIR 滤波器结构	307
8.4.2 多相滤波器实现	310
8.4.3 采样率转换系统的多级实现	311
8.4.4 用 MATLAB 设计采样率转换滤波器	315
8.5 小结	316
思考练习题	317
习题	317
第 9 章 数字信号处理的实现	319
9.1 数字信号处理算法的可计算性	319
9.1.1 数字滤波器的矩阵表示	319
9.1.2 优先图	321
9.2 数字信号处理的软件实现	322
9.3 数字信号处理中的有限字长效应	325
9.3.1 数值表示法对量化的影响	325
9.3.2 滤波器系数量化误差	327
9.3.3 模数转换器的量化误差	328
9.3.4 运算产生的误差	330
9.4 小结	331
思考练习题	331
习题	332
附录 MATLAB 信号处理工具箱函数表	334
参考书目	339

第 1 章 离散时间信号与系统

本章从信号的概念着手学习以下内容：

- 信号和信号处理的概念；
- 离散时间信号的定义及其表示方法；
- 几种常用的典型序列；
- 周期序列及其周期计算；
- 序列的移位、翻转、和、积、累加、差分、时间尺度变换、卷积和等运算；
- 用单位脉冲序列的移位加权和表示任意序列的方法；
- 系统的输入输出描述法，系统的因果性和稳定性；
- 线性时不变系统及其性质；
- 线性常系数差分方程的递推解法。

1.1 信号和信号处理

信号是传递信息的函数（或序列），该函数的图像称为信号的波形。通常是一个或者几个自变量的函数。仅有一个自变量的函数称为**一维信号**，而有几个自变量的函数称为**多维信号**。本书仅研究一维数字信号处理的理论与技术。就信号而言，自变量和函数值的取值有多种形式，通常把信号看作时间的函数，即把时间看作信号的自变量，而代表其他物理量，如距离、速度、温度、压力、电压、电流等随自变量变化而变化的量视为函数（因变量）。注意在讨论信号的有关问题时，“信号”与“函数（或序列）”两个词常互相通用。

信号在人们的日常生活中扮演了非常重要的角色。经常遇到的信号有语音、音乐、图片和视频信号等。例如，语音和音乐信号表示空间上某个点的空气压力，它是时间的函数。黑白图片是光强度的一种表示，它是两个空间坐标的函数。电视中的视频信号由称为帧的图像序列组成，是一个有三个变量的函数，包括两个空间坐标和一个时间坐标。

大多数信号都是自然产生的，信号也可以通过人工合成或计算机仿真产生。

信号携带着信息，各类信号只有经过一定的处理，才能具有实用价值。**信号处理**就是对信号进行分析、变换、综合、识别等加工，以达到提取有用信息和便于利用的目的。信息提取的方法取决于信号的类型以及信号中信息的性质。如果处理的设备用模拟部件，则称为**模拟处理**，模拟信号处理的英文缩写为 ASP。若系统中的处理部件用数字电路，信号也是数

字信号, 则这样的处理方法为**数字处理**, 数字信号处理的英文缩写为 DSP。

信号处理涉及信号的数学表示, 以及用以提取存在信息所执行的算法。信号可以用自变量的原始域中的基本函数表示, 或者用变换域中的基本函数表示。同样, 信息提取处理可以在信号的原始域或变换域中进行。

1.1.1 信号的特征与分类

根据自变量的特征以及函数的定义域, 可以将信号定义成不同的类型。信号的自变量可以是连续的或离散的。同理, 信号也可以是自变量的一个连续的或离散的函数。此外, 信号可以是一个实值函数或一个复值函数。

根据信号来源的多少, 可以定义一个信号源产生的信号为一维信号, 或标量信号; 由多个源产生的信号为**多维信号**, 或向量信号。向量信号也称为多通道信号。

日常生活中接触最多的是语音信号和图像信号。语音信号是以时间为自变量的典型一维 (1-D) 信号的例子, 而图像信号是二维 (2-D) 信号的典型例子。如照片等图像信号, 是以两个空间变量为其两个自变量。目前不太多见的黑白视频信号的每一帧是空间的两个离散变量的函数, 它是一个二维图像, 而其每一帧在离散时间上按顺序出现。因此, 黑白视频信号是以两个空间变量和一个时间变量为自变量的三维 (3-D) 信号。常见的彩色视频信号则是由表示红、绿、蓝 (RGB) 三原色的三个三维信号组成的三通道信号。

信号的**幅度**, 在指定的自变量上的信号的值称为信号的幅度。习惯上把幅度随着自变量的变化称为**波形**。

因为通常把时间作为自变量, 习惯上若自变量是连续的, 则该信号称为**连续时间信号** (或**时域连续信号**); 若自变量是离散的, 则该信号称为**离散时间信号** (或**时域离散信号**)。连续时间信号定义在每个时刻, 而离散时间信号定义在离散时刻。因此, 一个离散时间信号实质上是一个数字的序列。

在规定的连续时间范围内, 信号的幅值可以取连续范围内的任意值, 或者说具有连续幅值的连续时间信号称为**模拟信号**。在日常生活中会经常遇到的多为模拟信号, 通常以自然方式产生。语音信号就是模拟信号的一个典型例子。用有限个数字表示的离散幅值的离散时间信号称为**数字信号**, 即**数字信号**是自变量取离散值, 其幅度也被量化且被编码的离散时间信号。与数字信号一样自变量取离散值, 但是具有连续幅值的离散时间信号称为**抽样数据信号** (或**采样数据信号**, 有时也称**采样信号**)。从这个意义上可以说数字信号是量化的抽样数据信号。另外, 具有离散振幅值的连续时间信号称为**量化阶梯信号**。图 1-1 所示为这四种类型的信号。

常用的信号表示方法有公式法、图示法和集合法。公式法的特点是从数学表达式中清楚地看到它的函数关系。一维连续时间信号的自变量通常用 t 表示。而对于一维离散时间信号, 离散的自变量通常用 n 表示。例如, $x(t)$ 表示一个一维连续时间信号, 而 $x(n)$ 表示一个一维离散时间信号。离散时间信号中的每个成员 $x(n)$ 称为**样本**。离散时间信号一般是通过对原始的连续时间信号以相同的时间间隔采样产生的。图示法表示信号的特点是比较直观, 而集合法便于数据的存储和用计算机进行分析, 其缺点与图示法类似, 不便于用数学工具进行分析。

二维连续时间信号的两个自变量是空间坐标, 通常用 x 和 y 表示。如黑白图像的强度

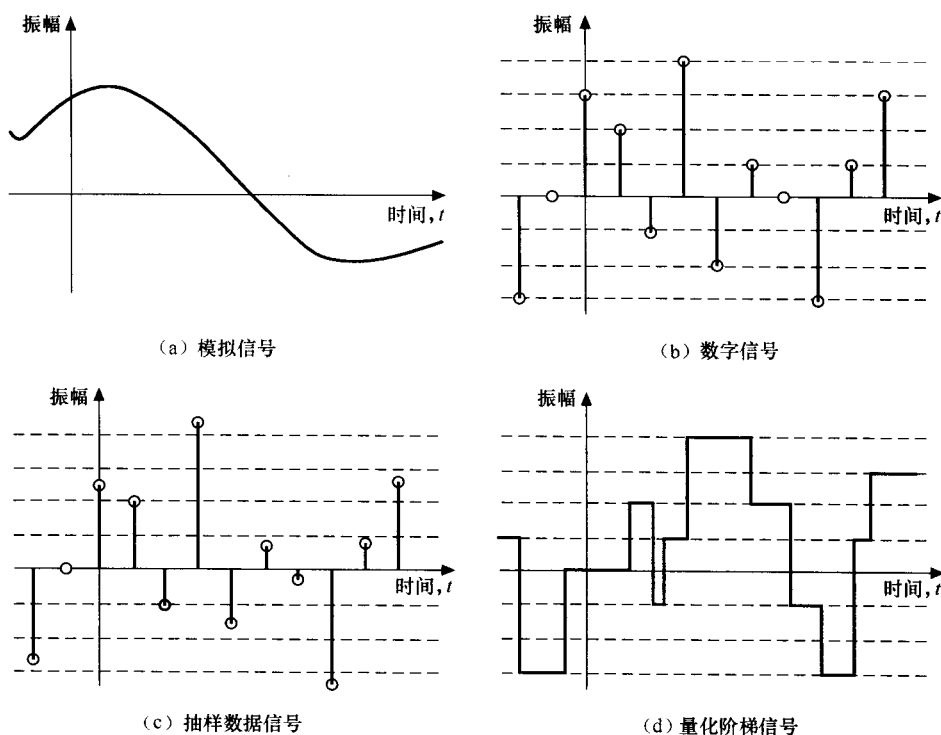


图 1-1 四种类型的信号

可以表示为 $u(x, y)$ 。彩色图像由表示红、绿、蓝三原色的三个信号组成，可表示为

$$u(x, y) = \begin{bmatrix} r(x, y) \\ g(x, y) \\ b(x, y) \end{bmatrix}$$

目前生活中大量使用的计算机图像（数字图像）是二维离散信号，它的两个自变量通常用离散化的空间变量 m 和 n 描述，可将数字图像通常用 $v(m, n)$ 表示。黑白视频序列是三维信号可以用 $u(x, y, t)$ 表示，这里用 t 表示时间变量， x 和 y 分别表示两个空间变量。彩色视频信号是向量信号，可以用红、绿、蓝三原色的三个信号表示。

信号的分类不限于上述方法，还可以根据信号的其他特征进行。如根据信号是否有唯一的描述对信号进行分类。一个完全定义的过程（如通过一个数学表达式或规则，或通过查找表）来确定的信号称为**确定信号**。反之，由随机方式产生且不能在时间上预测的信号称为**随机信号**。本书主要涉及离散时间的确定信号的处理。其次，由于实际的离散时间系统是用有限字长来存储信号并用数学运算的方法对信号进行处理的，所以需要分析有限字长效应对离散时间系统性能的影响，因此，将某些信号表示为随机信号，用统计的方法进行分析会比较方便。下面先介绍一些典型的模拟信号处理运算。

1.1.2 典型的信号处理运算

各类信号只有经过一定的处理，才能具有实用价值。如前所述，信号处理就是对信号进

行分析、变换、综合、识别等加工,以达到提取有用信息和便于利用的目的。在实际应用中,对信号的处理使用了不同类型的信号处理运算。对于模拟信号的处理,通常都在时域进行,而对于离散时间信号的处理,既可以在时域进行,也可以方便地在频域进行。但不论何种情况,信号处理所需的运算是通过一些基本运算的组合来实现。值得注意的是,尽管在某些应用中,这些运算可以离线实现,但它们的实现通常是实时的或准实时的。下面介绍典型的信号处理运算。

1. 时域的基本运算

时域中三个最基本的信号运算是乘、延时和相加。

乘(也称标乘)运算是将信号与一个正的或负的常数相乘。例如,若 $x(t)$ 是一个模拟信号,则乘运算产生信号 $y(t) = ax(t)$, 其中 a 是标乘常数。习惯上将乘常数的幅度大于 1 的运算称为放大,相乘的常数称为增益;而将乘常数幅度小于 1 的运算称为衰减。

延时运算产生一个原信号延时后的复制信号。例如, $y(t) = x(t - t_0)$ 是 $x(t)$ 延时 t_0 后的信号,其中 t_0 通常被假定为一个正数。若 t_0 是负数,则对应的运算是一个超前运算。

许多应用需要通过两个或多个信号的运算来生成一个新信号。例如, $y(t) = x_1(t) + x_2(t) - x_3(t)$ 是三个模拟信号 $x_1(t)$, $x_2(t)$ 和 $x_3(t)$ 通过相加产生的信号。而两个信号 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的相乘产生信号 $z(t) = x_1(t)x_2(t)$ 。

另外两个基本运算是积分和微分。模拟信号 $x_1(t)$ 的积分生成信号 $y(t) = \int_{-\infty}^t x_1(t) dt$, 而 $x(t)$ 的微分得到信号 $w(t) = dx(t)/dt$ 。

上述乘、延时和相加三种基本运算,也适用于离散时间信号,相关内容将在后面详细讨论。而积分和微分运算,可在离散时间域近似实现。

通过两个或多个基本运算的组合实现更为复杂的信号运算。例如,连续时间信号 $x(t)$ 的连续傅里叶变换 $X(j\Omega)$ 定义为

$$X(j\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\Omega t} dt \quad (1-1)$$

$X(j\Omega)$ 称为 $x(t)$ 的频谱。

2. 滤波

滤波主要目的是根据指定的要求改变组成信号的频率成分,是使用最广泛的复杂信号处理运算之一。实现滤波运算的系统称之为**滤波器**。

设用冲激响应 $h(t)$ 来表示滤波器,则滤波器对应于输入 $x(t)$ 的输出 $y(t)$ 可以用卷积积分描述为

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t - \tau)x(\tau) d\tau \quad (1-2)$$

这里假设在输入信号作用时滤波器是零初始条件的松弛状态。在频域中,上式可表示为

$$Y(j\Omega) = H(j\Omega)X(j\Omega) \quad (1-3)$$

其中, $Y(j\Omega)$, $X(j\Omega)$ 和 $H(j\Omega)$ 分别表示 $y(t)$, $x(t)$ 和 $h(t)$ 的连续时间傅里叶变换。

滤波器允许通过的频率范围称为**通带**,被滤波器阻止通过的频率范围称为**阻带**。根据滤波运算的性质可以定义不同的滤波器类型,一般定义为低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器、

带阻滤波器、陷波器、梳状滤波器等。其中,允许低于某个特定频率 f_p (称为通带截止频率) 的所有低频成分通过,并阻止所有高于 f_s (称为阻带截止频率) 的高频成分的滤波器称之为**低通滤波器**。与低通滤波器相对应,允许所有高于某个通带截止频率 f_p 的高频成分通过,并阻止所有低于阻带截止频率 f_s 的低频成分的滤波器称之为**高通滤波器**。允许两个通带截止频率 f_{p1} 和 f_{p2} 之间的所有频率成分,其中 $f_{p1} < f_{p2}$,并阻止所有低于通带截止频率 f_{p1} 和高于通带截止频率 f_{p2} 的频率成分通过的滤波器称之为**带通滤波器**。与带通滤波器相对应,阻止两个阻带截止频率 f_{p1} 和 f_{p2} 之间的所有频率成分通过,允许所有低于通带截止频率 f_{p1} 和高于通带截止频率 f_{p2} 的频率成分通过的滤波器称之为**带阻滤波器**。图 1-2 (a) 所示为一个由频率分别为 50Hz, 100Hz 和 200Hz 的三个正弦成分组成的信号。图 1-2 (b) 到图 1-2 (e) 所示为上述四种类型的滤波运算经适当选择截止频率后得到的结果。

陷波滤波器是用来阻止单个频率分量的带阻滤波器。有多个通带和多个阻带的滤波器称之为**多频带滤波器**。**梳状滤波器**则是设计用来阻止某个低频的整数倍频率的成分。

实际中应当注意,一般情况下信号或多或少受到不希望的信号(称为干扰或噪声)的干扰。其中一种常见情况是干扰期望信号的噪声可能是单一频率的正弦信号,例如,在我国由电力线辐射的电磁场产生的噪声表现为污染期望信号的一个 50Hz 的正弦信号,从被污染的信号恢复出期望信号的一种有效方法是通过陷波频率为 50Hz 的陷波器。另一种常见情况是应用中期望的信号占据从直流(dc)到某个频率 f_L 的低频带,并被一个频率成分大于 f_H 的高频噪声污染,其中 $f_H > f_L$ 。这时可以将被噪声污染的信号通过一个截止频率为 f_c 的低通滤波器来恢复期望信号,其中 $f_L < f_c < f_H$ 。

3. 复数信号的产生

从数学角度看,信号可以是实数值信号或者复数值信号。实数值信号通常称为实数信号,而复数值信号称为复数信号。显然,所有自然产生的信号都是实值信号。在工程实际应用中,常常需要由具有更多期望性质的实数信号来构成复数信号。

实数信号通过数学运算可以产生复数信号,其方法有多种。例如,通过希尔伯特变换器可以用来产生复数信号,该变换由如下冲激响应 $h_{HT}(t)$ 描述

$$h_{HT}(t) = \frac{1}{\pi t} \quad (1-4)$$

其傅里叶变换 $H_{HT}(j\Omega)$ 为

$$H_{HT}(j\Omega) = \begin{cases} -j, & \Omega > 0 \\ j, & \Omega < 0 \end{cases} \quad (1-5)$$

实数模拟信号 $x(t)$, 其傅里叶变换为 $X(j\Omega)$, 实数信号的幅度谱具有偶对称性,而相位谱具有奇对称性。因此,实数信号 $x(t)$ 的频谱 $X(j\Omega)$ 包含了正负频率,于是可以表示为

$$X(j\Omega) = X_p(j\Omega) + X_n(j\Omega) \quad (1-6)$$

其中, $X_p(j\Omega)$ 是 $X(j\Omega)$ 的正频率部分, $X_n(j\Omega)$ 是 $X(j\Omega)$ 的负频率部分。若将 $x(t)$ 通过一个希尔伯特变换器,则其输出 $\hat{x}(t)$ 的频谱 $\hat{X}(j\Omega)$ 可以表示为

$$\hat{X}(j\Omega) = H_{HT}(j\Omega)X(j\Omega) = -jX_p(j\Omega) + jX_n(j\Omega) \quad (1-7)$$

由式 (1-7) 可以看出 $\hat{x}(t)$ 也是一个实数信号。由 $x(t)$ 与 $\hat{x}(t)$ 的和组成的复数信号 $y(t)$ 为

$$y(t) = x(t) + j\hat{x}(t) \quad (1-8)$$

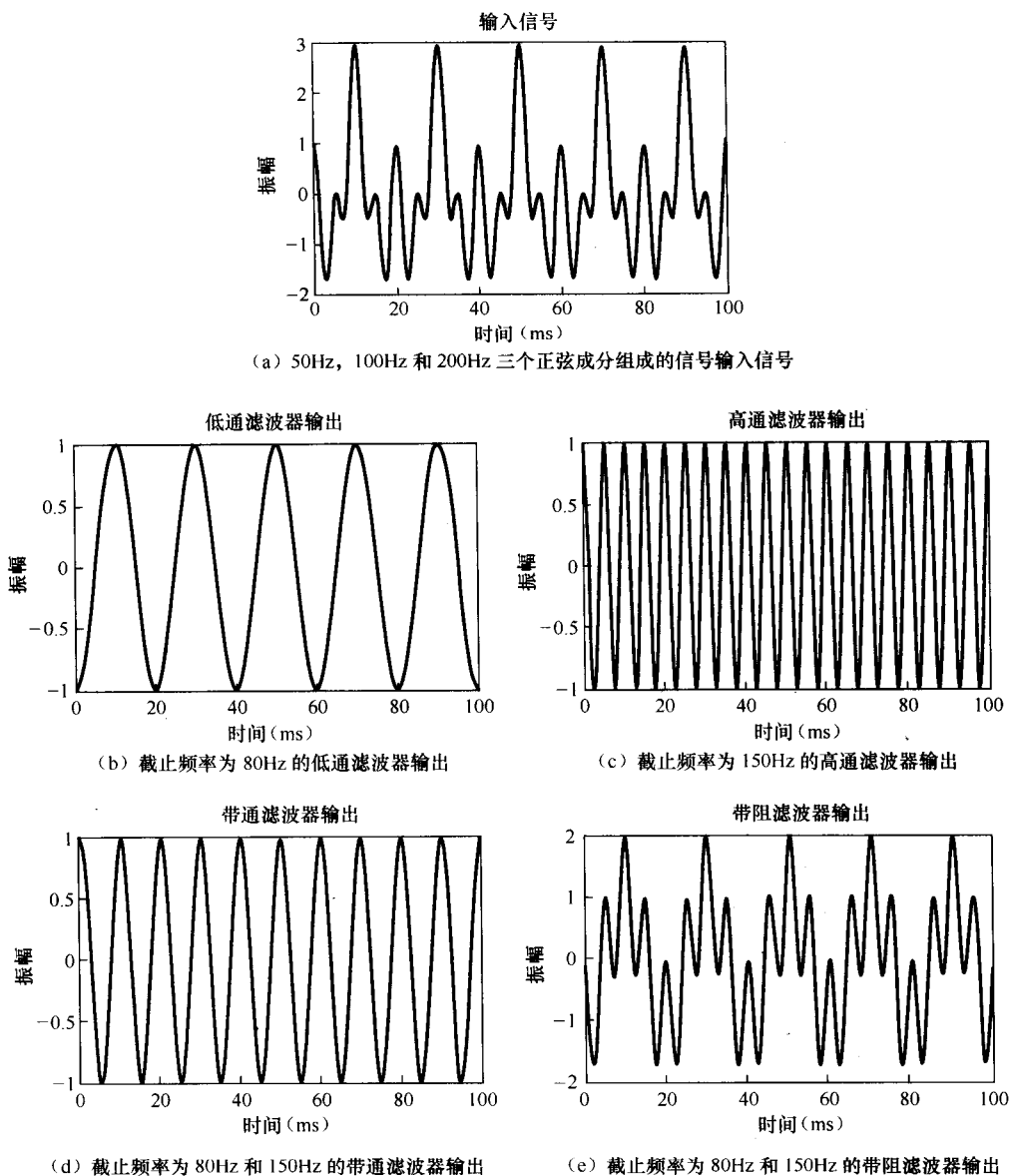


图 1-2 三个正弦成分组成的信号及四种类型的滤波运算后得到的结果

信号 $x(t)$ 和 $\hat{x}(t)$ 分别称为 $y(t)$ 的同相分量和正交分量。 $y(t)$ 的连续时间傅里叶变换则可以表示为

$$Y(j\Omega) = X(j\Omega) + j\hat{X}(j\Omega) = 2jX_p(j\Omega) \quad (1-9)$$

因此, 复数信号 $y(t)$ 称为解析信号, 它只存在正频率成分。

图 1-3 所示为从实数信号产生解析信号的框图。希尔伯特变换器的一个应用是实现单边带调制, 如图 1-8 所示。

除了上述产生复数信号的方法外, 一种更直接的复数信号产生方法是, 用两个实信号分别作为复数信号的实部和虚部来构成复数信号。复数信号的一个重要用途是人为地将两个实

数信号合成为一个复数信号，这样可以在一次复数信号的傅里叶变换运算中完成两个实数信号的变换，从而提高运算效率。

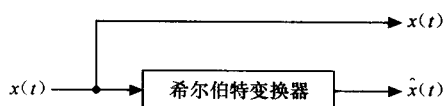


图 1-3 用希尔伯特变换器产生解析信号

4. 幅度调制

在通信领域中，基本任务之一是信号的远距离高效传输。对于信号的远距离传输，经常使用的传输介质是电缆、光纤或者空气等。这些不同的介质都在高频范围有一个较为合适的有效信号传输带宽，为了在信道上传输低频信号，在信号的发送端，需要通过调制运算将信号变换成高频信号。而在接收端，则需要将接收到的已调高频信号进行解调，并通过后续处理提取所要求的低频信号。模拟信号调制的方案主要有幅度调制、频率调制、相位调制和脉冲幅度调制四种类型。下面简单讨论幅度调制的概念。

在幅度调制方案中，高频正弦信号 $A\cos(\Omega_0 t)$ 称为**载波信号**，其幅度随着称为**调制信号**的低频带限信号 $x(t)$ 变化，产生一个称为**已调信号**的高频信号 $y(t)$ ，即

$$y(t) = Ax(t)\cos(\Omega_0 t) \quad (1-10)$$

由此可容易地理解，幅度调制可以通过调制信号与载波信号的乘积形式来实现。 $y(t)$ 的频谱 $Y(j\Omega)$ 可以表示为

$$Y(j\Omega) = \frac{A}{2}[X(j(\Omega - \Omega_0)) + X(j(\Omega + \Omega_0))] \quad (1-11)$$

其中 $X(j\Omega)$ 是调制信号 $x(t)$ 的频谱。图 1-4 所示为在假定载波频率 Ω_0 比包含在 $x(t)$ 中的最高频率 Ω_m 大很多的情况下，调制信号和已调信号的频谱。从图 1-4 (a) 中可以看出， $y(t)$ 是一个中心在 Ω_0 、带宽为 $2\Omega_m$ 的带限高频信号。

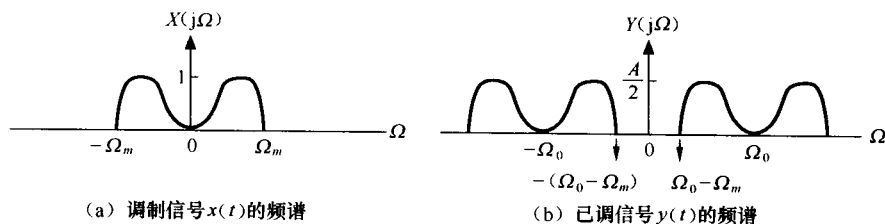


图 1-4 调制信号和已调信号的频谱（为方便起见，两个频谱都用实函数表示）

调幅信号在 Ω_0 到 $\Omega_0 + \Omega_m$ 之间的部分称为**上边带**，而在 Ω_0 到 $\Omega_0 - \Omega_m$ 之间的部分称为**下边带**，如图 1-4 (b) 所示。由于在调制信号中产生了两个边带并且没有载波分量，因此，该过程称为**抑制载波双边带 (DSB-SC) 调制**。

下面讨论 $y(t)$ 的解调。假定 $\Omega_0 > \Omega_m$ ，先用一个与载波同频的正弦信号乘以 $y(t)$ 得 $r(t)$ ，即

$$r(t) = y(t)\cos\Omega_0 t = Ax(t)\cos^2(\Omega_0 t) \quad (1-12)$$

或者

$$r(t) = y(t)\cos\Omega_0 t = \frac{A}{2}x(t) + \frac{A}{2}x(t)\cos(2\Omega_0 t) \quad (1-13)$$

上述结果表明乘积信号由载波频率为 Ω_0 的调幅信号和标乘因子 $1/2$ 的原调制信号组成。 $r(t)$ 的频谱 $R(j\Omega)$ 如图 1-5 所示，由图可见，利用一个截止频率 Ω_c 满足关系