



新视野电子电气科技丛书

Digital Signal Processing, second edition

数字信号处理

(第2版)

◎姚天任 编著

清华大学出版社





新视野电子电气科技丛书

Digital Signal Processing, second edition

数字信号处理

(第2版)

◎姚天任 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统介绍数字信号处理的基本理论、重要概念和设计方法。第1章,综述数字信号处理学科的内容、发展概况和应用领域;第2章,介绍离散时间信号和离散时间系统的基本理论;第3章,讨论离散傅里叶变换的理论及其快速算法;第4章,介绍 FIR 和 IIR 滤波器的各种结构和有限字长效应;第5章,介绍 FIR 和 IIR 数字滤波器的设计方法,以及微分器和 Hilbert 变换器的设计方法;第6章,讨论多速率数字信号处理。

本书注重基本概念、基础理论和基本方法的阐述,突出重点,分散难点,并配有丰富的例题和习题,适于作为教材,也便于自学。

本书可作为高等学校电子信息类、自动化类、计算机类等理工科专业的本科生教材,也可作为这些专业的科研人员和技术人员的参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理/姚天任编著. —2版. —北京:清华大学出版社,2018
ISBN 978-7-302-49254-2

I. ①数… II. ①姚… III. ①数字信号处理 IV. ①TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 002501 号

责任编辑:文 怡

封面设计:台禹微

责任校对:白 蕾

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京泽宇印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:38.5

字 数:864 千字

版 次:2011 年 3 月第 1 版 2018 年 1 月第 2 版

印 次:2018 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:99.00 元

产品编号:072168-01

第2版前言

本书第1版是《电子信息学科基础课程系列教材》之一,但在教材使用过程中,普遍觉得内容的深度和广度不是很适合近年来加强基础、减少学时、精简教学内容的要求。例如,多速率数字信号处理的内容实际上已超出对本科生的要求。即使在有关数字信号处理基础理论即离散傅里叶变换和数字滤波器的内容中,也有一些内容的深度超出对本科生的要求。例如,时间抽取基2FFT算法的实现,DFT的处理增益,计算DFT的其他快速算法,数字滤波器的浮点实现,IIR滤波器中乘法运算舍入噪声的统计分析,数字滤波器的浮点实现,利用MATLAB分析数字滤波器的有限字长效应,线性相位FIR滤波器振幅响应的统一表示,微分器和Hilbert变换器等。但是,这些却又是数字信号处理应用中的重要内容。因此,在对本书第1版修订后将其从系列教材独立出来,作为各领域从事数字信号处理理论研究和工程应用人员的参考书。修订后的第2版相较于第1版,内容没有大的变动,只是改正了第1版中的一些错误,并对文字做了一些修改。

作 者

2017年10月

于华中科技大学

第1版前言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,适合作为信息与通信工程、自动化、计算机、电子科学与技术、测控技术与仪表、生物医学工程、雷达、声呐等理工科专业的本科生的教材,也适合作为这些专业的科研人员和技术人员的参考书。学习本书之前,读者需具有信号与线性系统的基础知识。

信息科学是研究信息的获取、传输、处理和应用的科学。数字化、网络化和智能化是信息技术发展的方向,其中数字化是网络化和智能化的基础。因此,数字信号处理成为信息科学中内容异常丰富、发展非常迅速和应用十分广泛的一门学科。作为本科生的一门重要专业基础课,数字信号处理课程应当把数字信号处理学科的基础理论、基本概念和基本方法作为重点内容。这些内容主要包括离散时间信号和离散时间系统的时域和频域分析方法,离散傅里叶变换及其快速算法,以及数字滤波器等理论,这些正是本书的主要内容。学习完本书后,读者就有条件进一步学习有关的研究生课程。

数字计算机和信号处理在众多领域的广泛应用,促使数字信号处理学科产生出许多分支学科。如果把这些分支学科看成是由数字信号处理的某些“根”衍生出来的,那么,这些“根”应该包括:多速率信号处理和滤波器组、自适应滤波器、时频分析、非线性信号处理。这四方面内容的理论基础则是被称为经典数字信号处理两大支柱的离散傅里叶变换(discrete Fourier transformation, DFT)及其快速算法(fast Fourier transformation, FFT)和数字滤波器,本书正是以这两方面的核心内容为基础展开的。这两方面的核心内容的理论基础,是离散时间信号和离散时间系统的基本理论。考虑到与“信号与线性系统”课程内容的衔接,本书没有重复其中有关连续时间信号和系统的理论,只是重点复习并深化解了离散时间信号和系统理论中的某些重要概念,如数字频率、序列的抽取和内插、循环卷积、频谱混叠、离散时间系统的因果性和稳定性等概念。此外,本书特别强调了正弦序列和复指数序列的离散时间傅里叶变换在理论和实际应用中的重要作用。

关于离散傅里叶变换及其快速算法,本书重点阐述了 DFT 的物理意义、DFT 的幅度、时间轴和频率轴、几种傅里叶分析方法之间的联系等重要概念;特别对矩形序列的 DFT 进行了详细分析;对加窗截断在 DFT 中引起的频谱泄漏现象和序列补零对 DFT 的影响等问题,从理论与实际的结合上进行了深入分析。DFT 不仅是重要的理论成果,而且已经成为线性滤波、谱分析、相关分析等应用领域的重要工具。DFT 之所以重要,不仅由于它能够成功地对离散时间信号和系统进行频域描述和分析,而且还由于它具有许多行之有效的快速计算方法,其中应用最为广泛的一类方法就是 FFT。本书对 FFT 的

第1版前言

常用算法及其 MATLAB 实现方法进行了详细介绍。此外,还对 FFT 在计算线性卷积和实现分段卷积等应用中需要考虑的实际问题,例如输入数据的采集和处理、算法程序的编写、处理增益,以及 FFT 计算结果的解读等进行了讨论。

关于数字滤波器,本书用了第 4 和第 5 两章篇幅进行讨论。第 4 章分两大部分,第一部分对 FIR 和 IIR 滤波器的各种结构进行全面介绍;第二部分详细讨论滤波器实现中的有限字长效应。第 5 章,全面介绍 FIR 和 IIR 数字滤波器的各种实用设计方法,也对微分器和 Hilbert 变换器的设计进行了介绍。所有设计方法的 MATLAB 实现是本章的重点之一。第 6 章,讨论多速率数字信号处理和滤波器组。除了对取样频率转换的理论和方法、取样频率变换的多相滤波器实现和多速率信号处理的典型应用等进行介绍外,还对正交镜像滤波器组的理论和设计方法进行了介绍。有关滤波器组的理论和方法涉及比较广泛的内容,其中许多属于研究生课程的内容,因此,本章只局限于介绍均匀滤波器组的基本理论。

本书的主要特点是强调基本概念、基础理论和基本方法,注意突出重点和分散难点,注意理论与实际的结合。因此,本书通过大量例题和习题介绍了如何利用 MATLAB 解决实际应用问题。

限于作者水平,书中疏漏之处在所难免,希望读者不吝赐教。

作 者

2010 年 12 月

于华中科技大学

第 1 章 概论	1
1.1 离散时间信号和数字信号	2
1.2 数字信号处理	3
1.3 数字信号处理的优点和局限	6
1.4 数字信号处理学科的内容、发展和应用	8
1.4.1 数字信号处理学科的内容	9
1.4.2 数字信号处理学科发展概况	9
1.4.3 数字信号处理的应用	12
1.5 本书内容简介	14
第 2 章 离散时间信号和离散时间系统	17
2.1 离散时间信号——序列	18
2.1.1 基型序列	18
2.1.2 模拟频率和数字频率	21
2.1.3 周期序列	28
2.1.4 序列的基本运算	31
2.2 离散时间系统	43
2.2.1 系统的线性、时不变性、因果性和稳定性	43
2.2.2 线性时不变系统	47
2.3 离散时间傅里叶变换	56
2.3.1 离散时间傅里叶变换的定义	56
2.3.2 DTFT 的性质	59
2.3.3 离散时间信号的频谱	61
2.3.4 离散时间系统的频率响应	62
2.4 z 变换	66
2.4.1 z 变换的定义和收敛域	67
2.4.2 逆 z 变换	71
2.4.3 z 变换的性质和常用 z 变换公式	78
2.5 传输函数	80
2.5.1 LTI 系统的传输函数	80

目录

2.5.2 利用传输函数分析系统的频率响应	81
2.5.3 利用传输函数分析系统的稳定性	84
2.5.4 利用传输函数计算 LTI 系统的输出	87
2.6 离散时间信号和系统的 MATLAB 分析	90
2.6.1 离散时间信号的产生	90
2.6.2 序列的基本运算	93
2.6.3 线性卷积和相关序列的计算	95
2.6.4 DTFT 的计算	97
2.6.5 系统频率响应的计算	99
2.6.6 系统的有理传输函数的计算	102
2.6.7 离散时间系统输出的计算	108
习题	111
第 3 章 离散傅里叶变换及其快速算法	115
3.1 DFT 的基本概念	116
3.1.1 DFT 的定义	116
3.1.2 由 DFT 重构序列	119
3.1.3 由 DFT 重构 DTFT	121
3.1.4 DFT 的物理意义	125
3.1.5 DFT 的幅度、时间轴和频率轴	128
3.1.6 4 种傅里叶分析方法	131
3.2 DFT 的性质	133
3.3 矩形序列的 DFT	146
3.4 利用 DFT 进行信号频谱分析	153
3.4.1 加窗截断造成频谱泄漏和分辨率降低	153
3.4.2 序列加窗对 DFT 的影响	160
3.4.3 序列补零对 DFT 的影响	166
3.5 利用 DFT 计算线性卷积	172
3.5.1 基本原理	172
3.5.2 用 DFT 实现分段卷积	175
3.6 DFT 的快速计算方法：快速傅里叶变换	178
3.6.1 时间抽取基-2 FFT 算法的信号流程图	179

3.6.2	时间抽取基-2 FFT 算法结构的特点	181
3.6.3	时间抽取基-2 FFT 算法的计算量	183
3.6.4	倒序: 输入时间序列的重排	184
3.6.5	时间抽取基-2 FFT 的其他算法结构	186
3.6.6	频率抽取基-2 FFT 算法	188
3.6.7	计算 FFT 的 MATLAB 内部函数	191
3.7	实际应用 FFT 算法时需要考虑的几个问题	194
3.7.1	输入数据的采集和处理	194
3.7.2	时间抽取基-2 FFT 算法的实现	196
3.7.3	DFT 的处理增益	199
3.7.4	FFT 计算结果的解读	205
3.8	计算 DFT 的其他快速算法	206
3.8.1	混合基 FFT 算法	207
3.8.2	基-4FFT 算法	211
3.8.3	线性调频 z 变换(CZT)	214
习题		221
第 4 章	数字滤波器的结构和有限字长效应	230
4.1	FIR 滤波器的直接型结构和级联结构	231
4.1.1	FIR 直接型结构	231
4.1.2	FIR 级联结构	232
4.2	FIR 滤波器的格型结构	233
4.3	线性相位 FIR 滤波器	238
4.3.1	FIR 滤波器的相位响应	238
4.3.2	线性相位 FIR 滤波器 4 种不同类型的单位冲激响应	246
4.3.3	线性相位 FIR 滤波器的结构	248
4.3.4	线性相位 FIR 滤波器的振幅响应	249
4.3.5	线性相位 FIR 滤波器的零点分布	252
4.4	FIR 滤波器的频率取样结构	256
4.4.1	频率取样结构的组成	256
4.4.2	频率取样结构的改进	258
4.4.3	线性相位 FIR 滤波器的频率取样结构	260

目录

4.5 IIR 滤波器的结构	262
4.5.1 IIR 滤波器的直接型结构	262
4.5.2 IIR 滤波器的并联结构	266
4.5.3 IIR 滤波器的级联结构	270
4.6 全通滤波器和最小相位滤波器	272
4.6.1 全通滤波器	272
4.6.2 最小相位滤波器	274
4.6.3 非最小相位 IIR 滤波器的分解	279
4.7 IIR 滤波器的格型结构	282
4.7.1 全极点格型滤波器	282
4.7.2 极点-零点格型滤波器	285
4.8 FIR 滤波器的有限字长效应	290
4.8.1 二进制数的表示方法	290
4.8.2 输入信号的量化误差	291
4.8.3 FIR 滤波器的系数量化误差	297
4.8.4 FIR 滤波器有限字长效应的统计分析	300
4.9 IIR 滤波器的有限字长效应	303
4.9.1 系数量化误差对零点和极点位置的影响	304
4.9.2 IIR 滤波器中乘法运算舍入噪声的统计分析	307
4.9.3 IIR 滤波器中加法运算的溢出和定标	313
4.9.4 数字滤波器的浮点实现	319
4.10 IIR 滤波器的零输入极限环现象	320
4.11 利用 MATLAB 实现数字滤波器的结构	324
4.11.1 级联结构	324
4.11.2 并联结构	326
4.11.3 格型结构	329
4.12 利用 MATLAB 分析数字滤波器的有限字长效应	330
4.12.1 舍入和截尾量化	331
4.12.2 滤波器系数的量化对幅度响应和极点-零点位置的影响	332
4.12.3 IIR 滤波器极限环的 MATLAB 模拟	333
习题	336

第 5 章 数字滤波器的设计	344
5.1 数字滤波器的设计指标	345
5.1.1 因果数字滤波器的频率响应	345
5.1.2 数字滤波器的设计指标	349
5.2 FIR 滤波器的窗函数设计方法	353
5.2.1 冲激响应截断法	353
5.2.2 窗函数设计法	357
5.2.3 Kaiser 窗	360
5.3 设计 FIR 滤波器的频率取样方法	364
5.3.1 频率取样方法的基本原理	364
5.3.2 频率取样设计方法对过渡带的优化	366
5.4 设计 FIR 滤波器的最小二乘法	371
5.5 最优等波纹线性相位 FIR 滤波器的设计: Parks-McClellan 算法	376
5.5.1 线性相位 FIR 滤波器振幅响应的统一表示	376
5.5.2 Minimax 误差准则	378
5.5.3 交替定理	381
5.5.4 Parks-McClellan 算法	385
5.6 微分器和 Hilbert 变换器	388
5.6.1 微分器	388
5.6.2 希尔伯特变换器	391
5.7 窗函数法、频率取样法和最小二乘法的 MATLAB 实现	394
5.7.1 按照算法原理编写 m 文件	394
5.7.2 Kaiser 窗滤波器设计方法的 MATLAB 实现	401
5.7.3 设计线性相位 FIR 滤波器的 MATLAB 函数	402
5.8 用 MATLAB 设计最优等波纹线性相位 FIR 滤波器	407
5.9 IIR 数字滤波器的一般设计方法	412
5.9.1 设计 IIR 数字滤波器的两种方案	412
5.9.2 模拟低通滤波器的技术指标	413
5.9.3 平方幅度响应与传输函数的关系	415
5.10 常用 4 种原型滤波器	417
5.10.1 Butterworth 滤波器	417
5.10.2 Chebyshev I 型滤波器	422

目录

5.10.3	Chebyshev II 型滤波器	427
5.10.4	椭圆滤波器	428
5.11	模拟滤波器到数字滤波器的映射	431
5.11.1	冲激响应不变法	431
5.11.2	双线性变换法	435
5.12	频率变换	439
5.12.1	模拟频率变换	439
5.12.2	数字频率变换	449
5.13	设计 IIR 数字滤波器的 MATLAB 方法	455
5.13.1	一般步骤	455
5.13.2	用于设计 IIR 数字滤波器的主要 MATLAB 函数	460
5.14	MATLAB 中的滤波器设计和分析工具	470
习题		473

第 6 章	多速率数字信号处理	483
6.1	整数倍降低取样频率	484
6.2	整数倍提高取样频率	489
6.3	任意有理数倍取样频率变换	493
6.3.1	单级取样频率变换	493
6.3.2	多级取样频率变换	495
6.4	取样频率变换的多相滤波器实现	496
6.4.1	抽取器或内插器与滤波器的级联次序	497
6.4.2	FIR 滤波器的多相分解	498
6.4.3	抽取器和内插器的多相滤波器实现	501
6.5	任意倍数取样频率转换的时变滤波器实现	503
6.6	取样频率变换的 MATLAB 方法	507
6.6.1	整数倍提高取样频率	507
6.6.2	整数倍降低取样频率	510
6.6.3	有理数倍变换取样频率	512
6.7	多速率信号处理的典型应用	515
6.7.1	利用取样频率变换技术设计延时器	515
6.7.2	不同取样频率数字系统之间的接口	516

6.7.3 窄带滤波器的多速率设计	520
6.8 过取样 ADC 和过取样 DAC	522
6.8.1 ADC 的抗混叠滤波器和 DAC 的抗影像滤波器	522
6.8.2 过取样 ADC	526
6.8.3 过取样 Σ - Δ 模数转换	532
6.8.4 带有反馈噪声整形的过取样 DAC	539
6.9 数字滤波器组	546
6.9.1 分析滤波器组和合成滤波器组	546
6.9.2 滤波器组的多相滤波器结构	548
6.10 L 带滤波器和半带滤波器	550
6.10.1 L 带滤波器	550
6.10.2 半带滤波器	552
6.11 双通道正交镜像滤波器组	554
6.11.1 抽取-内插滤波器组	554
6.11.2 双通道滤波器组的无混叠失真条件和完全重构条件	555
6.11.3 无混叠失真双通道 QMF 组输出信号的完全重构条件	558
6.12 完全重构双通道 FIR 滤波器组	561
6.13 多通道正交镜像滤波器组	569
6.13.1 多通道滤波器组无混叠失真的条件	570
6.13.2 多通道滤波器组的多相结构	573
6.14 仿酉滤波器组	577
6.14.1 仿酉矩阵传输函数和无损系统	577
6.14.2 完全重构仿酉滤波器组	578
6.14.3 双正交滤波器组	580
6.15 余弦调制滤波器组	582
习题	587

附录 频率取样法设计线性相位 FIR 滤波器的过渡带优化取样值	594
---------------------------------------	-----

参考文献	598
------------	-----

第1章 概论

本章介绍数字信号处理的预备知识和基础知识,其中部分内容在“信号与线性系统”课程中已经详细讨论过。因此,本章只是强调基本概念,并对全书将采用的某些术语和符号做统一说明。此外,本章还要综述数字信号处理学科发展和应用的概况,并介绍本书的内容安排。

1.1 离散时间信号和数字信号

信号携带着信息,它是信息的表现形式,而信息则是信号包含的内容。在实际应用中,需要采集、分析、处理和应用各种各样的信号。在广播、电视、通信、雷达、声呐、遥控和遥测、计算机、机械振动、天文、气象、地球物理、地质勘探、地震、生物医学以及经济等领域中,都有各自需要处理、传输、储存和利用的大量信号,可以说,各种信号无处不在、无时不有。

信号可以是一个或多个自变量的函数,分别称为一维或多维信号。在信息和通信工程领域中,最常遇到的信号是以时间为自变量的一维信号(例如语音信号、音乐信号和数据信号)、以平面空间位置坐标为自变量的二维信号(例如静止图像信号)、以平面空间位置坐标和时间作为自变量的三维信号(例如活动图像信号或称视频信号),以及其他的控制信号和信令信号等。

在大多数应用中,一维信号的自变量是时间,但也可以是其他物理量,如位移或距离。在以时间为自变量的一维信号中,根据时间自变量是连续的或离散的,可以把信号分成连续时间信号和离散时间信号两大类。

连续时间信号的振幅可以是连续的,也可以是离散的。振幅离散的连续时间信号,它在时间上是连续的,而振幅只可以在有限个量化值中取值,因此这种信号具有阶梯形状的波形。振幅连续的连续时间信号称为模拟信号。实际上,“连续时间信号”与“模拟信号”这两个名词可以互相通用,经常指的是同一类信号。但是用得最多的是“连续时间信号”,本书用 $x(t)$ 表示连续时间信号;只有当与“数字信号”相提并论时才用“模拟信号”这个名词,并用 $x_a(t)$ 来表示,这里下标“a”表示“模拟”。

离散时间信号的振幅只在离散时间点(或离散瞬间)有值,因此,离散时间信号实际上是一个数值序列(简称为序列),序列的元素就是信号在离散时间点的振幅值。离散时间信号用序列符号 $x(n)$ 表示,这里 n 是整数自变量,它是序列中元素的下标,说明元素在序列中的位置。应当注意,只有 n 为整数时 $x(n)$ 才有定义,这是一个重要概念。离散时间信号的每个振幅值(即序列的每个元素),可以是未被量化的连续变量,因而是无限精确的;也可以是量化了的离散变量(通常称为量化变量,实际上它是一组量化值),因而是有限精度的。前者(即振幅连续取值的离散时间信号)称为取样数据信号(简称为取样信号),可以理解为在离散时间对模拟信号的取样;后者(即振幅离散取值的离散时间信号)称为数字信号。在实际应用中,只有在同时涉及量化前后的信号表示时,才需要区分离散时间信号的振幅值是否被量化,而在大多数情况下,“离散时间信号”与“数字信号”通常指的是同一类信号。关于离散时间信号的理论也适用于数字信号,所以这两个名词无

须严格区分。习惯上,“离散时间信号”多用于理论问题的讨论,而“数字信号”多用于工程设计和软、硬件实现。本书将统一用 $x(n)$ 表示离散时间信号或数字信号。在需要区分序列的振幅值是否被量化时,将用 $x(n)$ 表示未被量化的序列,而用 $\hat{x}(n)$ 表示量化了了的序列。

图 1-1 表示的是连续时间信号和离散时间信号的例子。其中,图(a)是时间和振幅都连续的模拟信号,图(b)是时间离散而振幅连续的取样信号,图(c)中的黑点是时间和振幅都离散的数字信号,图(d)是时间连续而振幅离散的量化阶梯信号,它是将数字信号的每个振幅量化值在每个取样间隔中保持恒定得到的。图(a)和图(d)属于连续时间信号,图(b)和图(c)属于离散时间信号。

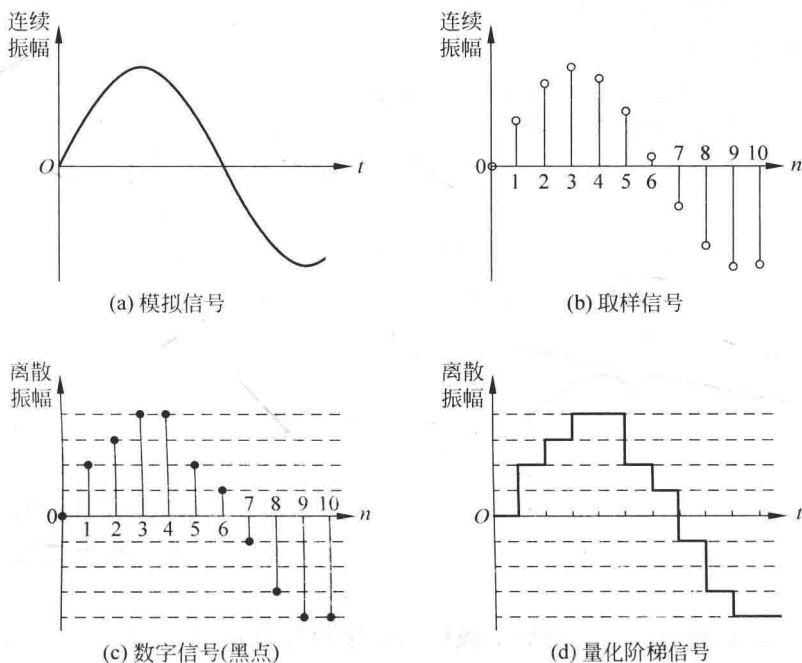


图 1-1 连续时间信号和离散时间信号示例

1.2 数字信号处理

信号处理的含义较广,涉及信号及其携带的信息的表示、处理和传输。例如,减小噪声和干扰以增强有用信号,通过某种处理从信号中提取某种信息(如从语音信号中获得一句话或一个字),在一张照片中辨识一个人,将雷达回波信号中的目标信号进行分类等,这些都属于信号处理的内容。

数字信号处理是指用数字序列或符号序列表示信号,并用数值计算方法对这些序列进行处理的理论、技术和方法,以及数字信号处理算法的软件和硬件实现。此外,数字信号处理也涉及数字传输。有人按照任务把数字信号处理分成信号分析和信号处理两类,前者包括信号的谱分析、特征参数检测和估计,后者包括滤波、变换和信号合成。其实,

数字信号处理的目无非是为了削弱信号中的多余内容,滤除混杂在有用信号中的噪声和干扰,以利于检测和估计信号的特征参数,或将信号变换成易于分析、辨识和利用的形式,所以信号分析和信号处理两方面任务的关系非常密切且很难清楚划分,而且这种分类不一定会给学科发展带来什么好处,因而强行把信号分析和信号处理加以区分没有多少实际意义,也是不必要的。

实际应用中遇到最多的是模拟信号。为了对模拟信号进行数字处理,首先需要用 A/D 转换器将模拟信号转换成数字信号。经过数字处理后,有时又需要用 D/A 转换器将处理结果还原成模拟信号。这一数字信号处理过程的原理可以用图 1-2 来说明。图中,前置滤波器的主要作用是防止由于取样可能带来的频谱混叠失真,因此又称为反混叠失真滤波器;后置滤波器的主要作用是平滑 D/A 转换器输出信号的阶梯效果,因此又称为平滑滤波器。

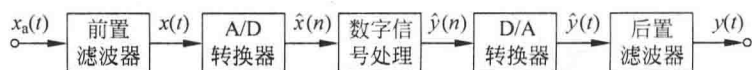


图 1-2 对模拟信号进行数字处理的原理性方框图

A/D 转换过程包括对模拟信号的取样和量化,以及转换成为二进制数这三个步骤。取样速率应当满足不失真重建信号的条件(即取样定理)的要求;量化限幅电平必须与输入模拟信号的动态范围相适应,量化字长(用于表示量化电平的二进制数的位数或比特数)应该满足离散振幅的精度或分辨率的要求。图 1-3 用实例说明 A/D 转换器的输入模拟信号(虚线)、取样信号(空心圆点)和输出数字信号(黑点)之间的关系。这里假设用 3 位二进制码表示离散振幅的 8 个量化电平,图中每个量化电平数值下面括号中是二进制码字。由二进制码字组成的数据流(或码流)用二进制脉冲序列表示,图中用正和负脉冲分别表示二进制数的 0 和 1。为了表示离散振幅的符号,还需要在每个二进制码的前面增加一个符号位。

数字信号 $\hat{x}(n)$ 经过数字处理后变成输出数字信号 $\hat{y}(n)$,它是 D/A 转换器的输入信号。在 D/A 转换过程中,二进制数值序列 $\hat{y}(n)$ 首先转换为连续时间脉冲序列,脉冲之间的空隙则利用所谓的“重构滤波器”填充起来。重构滤波器包括一个取样保持电路,把脉冲振幅在相邻脉冲之间的空隙中保持下来。在某些情况下,要求设计的取样保持电路能够按照预定的输出曲线在相邻脉冲之间的空隙中对输出信号进行外推逼近,而不是简单地保持脉冲幅度。这样,就把 $\hat{y}(n)$ 转换成为输出信号 $\hat{y}(t)$,它是振幅离散的连续时间信号,在采用取样保持的情况下,其波形是一个阶梯信号。后置滤波器是一个低通模拟滤波器,滤去阶梯信号 $\hat{y}(t)$ 的高频跳变,得到平滑的输出模拟信号 $y(t)$ 。图 1-4 是 D/A 转换器的输入信号、量化阶梯信号和平滑滤波器输出的模拟信号的波形示意图。

图 1-2 所示的数字信号处理系统,是假设被处理信号和处理结果都要求是模拟信号的情况。实际上,有的数字信号处理系统的输入已经是数字信号,这种情况下就无需 A/D 转换器和前置的反混叠失真滤波器;有的数字信号处理系统不要求输出模拟信号,处理结果得到的数字信号可以直接加以利用,这种情况下就不需要 D/A 转换器和后置