

数字信号处理实用教程

邮 电 高 等 学 校 教 材

赵尔沅 周利清 张延平 编著



人民邮电出版社

邮电高等学校教材

数字信号处理实用教程

赵尔沅 周利清 张延平 编著

人民邮电出版社

内 容 简 介

本书讲述数字信号处理的基本理论、基本方法和实现技术。全书共分四部分 12 章。第一部分, 由第 1 章至第 8 章组成, 是数字信号处理的基本内容, 介绍传统数字信号处理的理论基础、设计和算法, 包括离散信号和线性时不变离散系统的分析, 离散傅里叶变换及其快速算法, 数字滤波器的理论和设计, 以及硬件实现基础的有限字长效应和数字信号处理器等。第二部分是第 9 章, 介绍波数字滤波器, 它是一类低系数灵敏度数字滤波器的典型代表。第三部分是第 10 章, 介绍多率数字信号处理的基本原理和方法, 这是一类实用性很强的线性时变滤波系统。第四部分是第 11、12 章, 介绍离散随机信号分析和处理的基础知识, 包括功率谱估计、线性预测和最佳线性滤波。

本书涉及较广泛的数字信号处理内容, 除第一部分基础内容外, 其余各部分内容读者都可以根据需要选读。各部分均附有习题, 供读者自学之用。

本书可作为电子信息工程、通信工程、电子科学与技术、电气工程及其自动化和计算机科学与技术等专业本科生的教材, 也可作为其它相关专业或低年级研究生的教材或参考书, 还可供从事数字信号处理方面工作的科研技术人员学习参考。

邮电高等学校教材 数字信号处理实用教程

◆ 编 著 赵尔沅 周利清 张延平
责任编辑 陈 涛

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
人民邮电出版社河北印刷厂印刷
新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 16.75

字数: 414 千字 1999 年 6 月第 1 版

印数 1-2 000 册 1999 年 6 月河北第 1 次印刷

ISBN 7-115-07347-3/TN·1408

定价: 25.00 元

前 言

数字信号处理是近代迅速发展起来的一门新兴重要学科，它不仅在许多学科领域内取代了经典的模拟技术，而且随着计算机和微电子科学技术的进步，推进了数字信号处理技术自身的发展并提高了处理信号的能力。因而它被广泛地应用于雷达、地震、图像、通信系统、控制系统、宇航系统、地球资源卫星以及生物医学等众多科学技术领域中，并且前景广阔。

关于数字信号处理课程的教材，虽然自 70 年代末引入 A.V.Oppenheim, *Digital Signal Processing* 教材以来，国内已出版了相当数量的编著教材，且有的教材也被广泛应用，但鉴于数字信号处理的理论与方法的不断深入和发展，有必要对该课程的内容和体系进行修改调整，适当引入较成熟的新理论、新技术和新方法，以扩大读者的知识面，使之能适应面向 21 世纪发展的要求。

本教材在内容的组织上注意吸收现有教材的优点，力争做到加深基础同先进性、适用性较好地结合。对现有众多教材都涉及的基础理论、设计和算法力求明晰、简要；对引入的新内容，则论述适当详实，便于不同专业的学生对内容的不同需求和选择。教材每章后均附有较丰富的习题，便于自学、检查。

全书共分 12 章，第 1 章是数字信号处理概述，主要作用是使读者对学习本课程的意义及其内容有初步的认识，从而明确学习本课程的目的。第 2 章至第 7 章主要介绍传统数字信号处理的理论基础、设计和算法，包括线性时不变离散系统分析，变换技术(DFT, FFT 及 Chirp-z 变换)及滤波技术(IIR, FIR 数字滤波器)等。第 8 章为有限字长效应及数字信号处理器简介，是硬件实现的基础。第九章介绍波数字滤波器，它是一类重要的低系数灵敏度的数字滤波器，而且已经发展得相当完善。第十章介绍多率数字信号处理的基本原理和方法，它属于线性时变系统，在现代数字信号处理技术中被广泛采用。第 11 章介绍离散随机信号及其谱估计的基本理论和方法，为学习离散随机信号的处理打下基础。第 12 章介绍线性预测和最佳线性滤波，它是对随机信号进行预测和估值的重要基础内容。

本书前 8 章是学习数字信号处理课程必须掌握的基本内容，后 4 章则可根据不同专业的需要及学时分配等选修全部或部分内容。读者也可自行取舍，适当扩大数字信号处理的知识。

本书第 1、2、9、10、12 章由北京邮电大学赵尔沅编写；第 6、7、11 章由周利清编写，第 3、4、5、8 章由张延平编写，赵尔沅统一编审全书。

本书可作为通信工程、电子信息工程、电子信息科学与技术、电子科学与技术，计算机科学与技术及其他相关专业本科生的教材，或低年级研究生学习数字信号处理的教材和参考书。该书还可供从事数字信号处理方面工作的科研人员及工程技术人员学习参考。

由于编者水平有限，书中难免有不妥和错误之处，希望广大读者予以批评指正。

编 者

1999 年 5 月

目 录

第一章 概述	
1.1 信号、系统和信号处理	1
1.1.1 信号	1
1.1.2 系统	3
1.1.3 信号处理	4
1.2 数字信号处理系统	4
1.2.1 数字信号处理系统的构成	4
1.2.2 数字信号处理的优越性	5
1.3 模/数(A/D)和数/模(D/A)变换	6
1.3.1 模拟信号的取样	7
1.3.2 取样定理	8
1.3.3 量化和编码	10
1.3.4 数/模(D/A)变换	12
小结、习题	14
第二章 离散时间系统的分析基础	
2.1 离散时间信号—序列	15
2.1.1 离散时间信号的表示	15
2.1.2 基本的离散时间信号	16
2.2 离散时间系统	17
2.2.1 离散时间系统的运算	18
2.2.2 离散时间系统的分类	19
2.2.3 离散时间系统的联接	20
2.3 线性时不变系统的时域分析	21
2.3.1 LTI 系统的卷积和描述	22
2.3.2 LTI 系统的差分方程描述	23
2.3.3 IIR 和 FIR 离散系统	24
2.4 LTI 系统的变换域分析	25
2.4.1 Z 变换及其收敛域	25
2.4.2 Z 变换的基本定理与性质	27
2.4.3 Z 反变换	30
2.4.4 系统函数	33
小结、习题	37
第三章 离散傅里叶变换	
3.1 傅里叶变换	41
3.1.1 时间连续、频率连续的傅里叶变换	41

3.1.2	时间连续、频率离散的傅里叶变换——傅里叶级数	41
3.1.3	时间离散、频率连续的傅里叶变换——序列的傅里叶变换	42
3.2	周期序列的离散傅里叶级数	43
3.2.1	DFS 的定义	43
3.2.2	DFS 的性质	44
3.3	离散傅里叶变换	45
3.4	DFT 的性质	46
3.5	DFT 与 Z 变换、傅里叶变换的相互关系	53
3.6	DFT 在实际应用中的问题	55
3.6.1	混叠现象	55
3.6.2	频谱泄露	56
3.6.3	栅栏效应	57
	小结、习题	57
第四章 快速傅里叶变换		
4.1	直接计算 DFT 的运算量分析	59
4.2	按时间抽取的 FFT 算法	60
4.2.1	算法原理	60
4.2.2	算法特点	63
4.3	按频率抽取的 FFT 算法	65
4.3.1	算法原理	66
4.3.2	算法特点	67
4.4	IDFT 的快速计算方法	68
4.5	任意基 FFT 算法	69
4.6	线性卷积的 FFT 算法	72
4.6.1	重叠相加法	73
4.6.2	重叠保留法	74
4.7	线性调频 Z 变换(CZT)	75
4.7.1	算法原理	76
4.7.2	Chirp-Z 变换的实现	77
	小结、习题	78
第五章 数字滤波器的基本结构		
5.1	数字滤波器结构的图示法	79
5.2	无限长单位冲激响应(IIR)数字滤波器的基本结构	81
5.2.1	直接型	81
5.2.2	级联型	82
5.2.3	并联型	83
5.3	有限长单位冲激响应(FIR)数字滤波器的基本结构	84
5.3.1	横截型	84
5.3.2	级联型	84
5.3.3	线性相位结构	85

5.3.4	频率抽样结构	86
5.3.5	快速卷积结构	87
	小结、习题	88
第六章 IIR 数字滤波器的理论与设计		
6.1	IIR 数字滤波器的设计概述	89
6.1.1	数字滤波器的设计过程	89
6.1.2	IIR 数字滤波器的设计方法	89
6.1.3	设计原理	90
6.2	模拟滤波器的数字仿真	90
6.2.1	时域的数字仿真	90
6.2.2	频域的数字仿真	91
6.3	冲激响应不变法	92
6.3.1	冲激响应不变法的设计方法	92
6.3.2	Z 平面与 S 平面的映射关系	93
6.3.3	冲激响应不变法的特点	94
6.4	双线性变换法	94
6.4.1	双线性变换关系的导出	94
6.4.2	S 平面与 Z 平面的映射关系	96
6.4.3	双线性变换法的特点	97
6.5	模拟滤波器特性的逼近	98
6.5.1	问题的提出	98
6.5.2	Butterworth 低通滤波器特性的逼近	98
6.5.3	Chebyshev 低通滤波器特性的逼近	101
6.5.4	Cauer 滤波器特性简介	105
6.5.5	三种滤波器的比较	106
6.5.6	滤波器图表法设计	106
6.6	数字滤波器的变换	108
6.7	IIR 数字滤波器的计算机辅助设计	110
6.7.1	误差判别准则	110
6.7.2	关于最优化算法	112
	小结、习题	113
第七章 FIR 数字滤波器的理论与设计		
7.1	线性相位 FIR 滤波器的特性	115
7.1.1	线性相位 FIR 滤波器条件的推导	115
7.1.2	线性相位 FIR 数字滤波器的网络结构	117
7.1.3	线性相位 FIR 数字滤波器的频率响应	118
7.1.4	线性相位 FIR 数字滤波器的零极点分布	120
7.2	窗口法	120
7.2.1	窗口法的基本思想	121
7.2.2	理论分析	121

7.2.3	几种常用窗函数	123
7.2.4	设计方法小结	125
7.3	频率取样法	127
7.4	FIR 滤波器的优化设计	128
7.4.1	等波纹逼近(极小化极大误差法)	128
7.4.2	加权切比雪夫逼近问题	128
7.4.3	Remez 交换算法	132
7.5	IIR 滤波器与 FIR 滤波器的比较	134
	小结、习题	135
第八章 数字信号处理的有限字长效应及数字信号处理器		
8.1	二进制数的表示及量化处理	137
8.1.1	定点制与浮点制	137
8.1.2	负数的表示法——补码	139
8.1.3	量化处理方式——舍入与截尾	140
8.2	A/D 变换的量化误差分析	143
8.3	FFT 算法的量化误差分析	145
8.4	数字滤波器的系统量化误差和运算量化误差	148
8.4.1	数字滤波器系数量化误差分析	148
8.4.2	数字滤波器的运算量化误差	150
8.5	数字信号处理器简介	151
8.5.1	简介	151
8.5.2	数字信号处理器的结构与特点	152
8.6	数字信号处理器举例——TMS320C30	153
8.6.1	TMS320C30 的结构	154
8.6.2	存储器的组织	155
8.6.3	外部设备	156
8.6.4	TMS320C30 的指令集	157
8.6.5	TMS320C30 程序举例——快速傅里叶变换	158
	小结、习题	161
第九章 波数字滤波器		
9.1	波数字滤波器(WDF)的基本原理	163
9.1.1	数字滤波器流图的可实现性	163
9.1.2	频率变量和信号参量的选择	164
9.1.3	双端口网络的散射参数	166
9.1.4	灵敏度特性分析	167
9.2	波数字元件的实现及相互联接	169
9.2.1	波数字元件的实现	169
9.2.2	波数字元件的相互联接及适配器	171
9.3	用梯形结构实现波数字滤波器	177
9.3.1	谐振电路的等效变换	177

9.3.2	从梯形参考滤波器到 WDF 的转换	178
9.3.3	含有单位元件的梯形实现	180
9.4	用格形结构实现波数字滤波器	184
9.4.1	格形结构的波流图	184
9.4.2	全通函数的波数字实现	185
9.4.3	特征函数为双倒量的格形 WDF	187
	小结、习题	189
第十章 多率数字信号处理		
10.1	概述	191
10.2	按整数因子 D 抽取	192
10.2.1	按整数因子 D 抽取的原理	192
10.2.2	抽取系统的时域、频域分析	193
10.3	按整数因子 I 内插	194
10.3.1	按整数因子 I 内插的原理	194
10.3.2	内插系统的输入输出关系	195
10.4	按有理因子变换取样率	196
10.4.1	变换的基本概念	196
10.4.2	变换系统的时域、频域分析	196
10.5	多率数字系统的 FIR 型结构实现	197
10.5.1	直接型 FIR 结构的抽取和内插系统	198
10.5.2	多相滤波器结构	199
10.5.3	用时变滤波器结构实现按有理因子的变换系统	201
10.6	多率系统的多级实现	203
10.6.1	内插器与抽取器的多级实现	203
10.6.2	多级实现的特点	204
10.6.3	多级多率系统中滤波器的技术指标	204
10.7	多率数字信号处理的应用	205
10.7.1	FIR 窄带滤波器的实现	205
10.7.2	数字滤波器组的实现	207
10.7.3	正交镜像滤波器(QMF)组	209
10.7.4	子带编码(SBC)	214
	小结、习题	217
第十一章 离散随机信号及其谱估计		
11.1	离散时间随机信号	220
11.1.1	分布函数和分布密度	220
11.1.2	数字特征	221
11.1.3	平稳和遍历	222
11.1.4	功率谱密度	223
11.2	离散随机信号通过线性非时变系统	223
11.2.1	输出序列的均值	223

11.2.2	线性非时变系统对功率谱的传递情况	224
11.2.3	输出随机信号的平均功率	225
11.3	估计准则以及离散随机信号数字特征的估计	225
11.3.1	估计质量的评价准则	226
11.3.2	离散随机信号数字特征的估计	227
11.4	功率谱估计的非参数方法	228
11.4.1	自相关法	228
11.4.2	周期图法	229
11.4.3	经典法谱估计的质量评价	230
11.4.4	经典法谱估计的一些改进方法	230
11.5	功率谱估计的参数方法	231
11.5.1	AR 模型参数与自相关函数的关系	233
11.5.2	AR 模型与预测滤波器的关系	234
11.5.3	Y-W 方程的解法	235
11.5.4	Burg 算法	236
	小结、习题	238
第十二章 线性预测与最佳线性滤波		
12.1	线性预测	241
12.1.1	前向线性预测	241
12.1.2	后向线性预测	242
12.1.3	线性预测误差滤波器的格型结构	243
12.2	线性预测误差滤波器的性质	245
12.2.1	相位特性	245
12.2.2	白化特性	246
12.2.3	正交特性	246
12.3	AR 格型滤波器	247
12.4	最佳线性滤波	248
12.4.1	维纳滤波概述	248
12.4.2	维纳-霍夫(Wiener-Hopf)方程	249
12.5	FIR 维纳滤波器	250
12.6	IIR 维纳滤波器	251
12.7	非因果维纳滤波器	254
	小结、习题	255
	参考文献	257

第一章 概 述

学习本章可让读者对数字信号处理有个初步的概念，从而了解学习本课程的意义及其作用，增强学习目的性。本章对模拟信号转变成适合于数字处理的数字信号给予较详细介绍。

1.1 信号、系统和信号处理

1.1.1 信号

信号是信息的载体，可以定义为随时间、空间或任何其它独立变量变化的物理量。在数学上，信号可表示为单变量或多变量的函数。如

$$g(t) = A \sin(2\pi f_1 t + \theta) \quad (1.1.1)$$

$$g(x, y) = 3x + 2xy + 10y^2 \quad (1.1.2)$$

式(1.1.1)表示信号是随时间 t 而变化的单变量函数，式(1.1.2)表示信号是随两个独立变量 x 、 y 而变化的双变量函数，它们都可以精确地描述信号。图 1.1 (a) 绘出由式(1.1.1)表示的正弦信号。在实际中，有许多情况，信号的函数关系是未知的，或难以精确表述。如图 1.1 (b) 所示的语音信号不可能有上述精确表达的公式，只能用若干不同幅度频率和相位的正弦信号和近似。

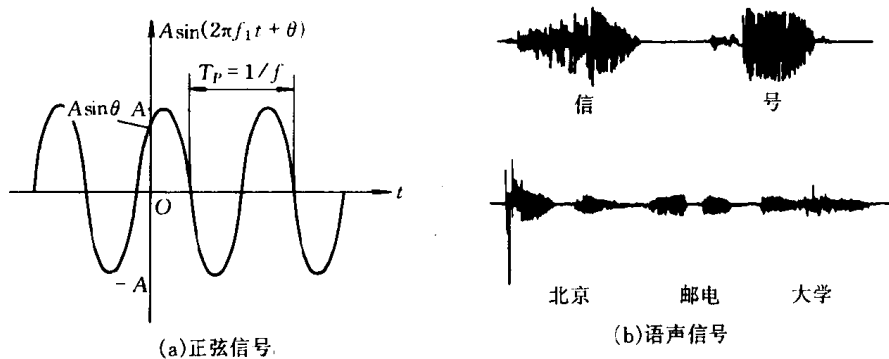


图 1.1 一维信号

$$s(t) \cong \sum_{i=1}^N A_i(t) \sin [2\pi f_i(t) + \theta_i(t)] \quad (1.1.3)$$

式中： $\{A_i(t)\}$ ， $\{f_i(t)\}$ ， $\{\theta_i(t)\}$ 分别表示正弦信号随时间变化的幅度，频率和相位的集合。

如果信号是单个独立变量的函数，该信号称为一维信号。图 1.1 中的都是一维信号。

如果信号是 M 个独立变量的函数, 则该信号称为 M 维信号, $M \geq 2$, $M = 2$ 时的信号为二维信号。图 1.2 所示的图像是二维信号的例子, 因为每点上的亮度 $I(x, y)$ 是两个独立变量即位置的函数。就黑白电视图像而言, 可表示为三维信号 $I(x, y, t)$, 因为亮度除位置外, 还是时间的函数。二维信号处理是在一维信号处理基础上的发展, 本书只讨论一维信号处理。



图 1.2 二维信号

如果信号的时间(独立)变量和取值都在区间 (a, b) 内连续变化, 则称该信号为模拟信号, 区间可以从 $-\infty$ 到 $+\infty$ 。一般客观存在的信号多为模拟信号, 如地震信号、音乐信号等。

如果信号的时间变量是连续的, 而其取值可以是连续的, 也可以是离散的(即幅度随时间 t 作跳跃变化), 则称该信号为连续时间信号。模拟信号可以视为连续时间信号的特例。

连续时间信号和模拟信号两个术语可以通用, 本书在讨论理论分析和计算方法上均采用连续时间信号; 而只在一些联系实际的应用中, 才用模拟信号。

如果信号只有在一系列分离的时间点(时刻)上才有取值, 则称该信号为离散时间信号, 时间点之间的间隔并不必须相等, 但在实际中, 为了计算方便和数学上易于处理, 通常将时刻取作等间隔, 如信号 $x(n) = e^{-|n|}$, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 是离散时间信号的例子。如果我们用下标 n 作为离散时间变量, 其信号的取值变为整形变量的函数(即是一数值序列), 因此, 离散时间信号在数学上可表示为实数或复数序列。

如果离散时间信号在离散时刻的取值也是离散的, 则称该信号为数字信号, 取值(幅度)的离散化是用量化方法完成的(该方法在本章的第三节中详细讨论), 故数字信号有时又称为量化信号。由于量化, 数字信号可以用一序列的数来表示, 每个数又可表示为二进制码的形式, 故非常适用于计算机或数字硬件系统的处理。

由于离散时间信号的理论一般说来, 也适用于数字信号, 故离散时间信号和数字信号两个术语在应用中常常没有严格的区别, 而本书的内容也主要讨论离散时间信号的分析 and 处理。

图 1.3 分别绘出了连续时间信号(模拟信号)、离散时间信号和数字信号的例子。

如果信号能用数学公式或数据表格精确地描述, 则称该信号为确定信号。确定信号的所有过去、现在和未来值都能精确知道, 没有任何不确定性。图 1.1 (a) 的正弦信号即为确定信号; 如果信号的未来值不能用时间函数精确地描述, 即信号的未来值是不确定的, 随机的, 则称该信号为随机信号。图 1.1 (b) 的语音信号即为随机信号。由于这类信号的未来值随时间推移而随机地变化, 故其理论分析的数学工具是概率论和随机过程。

确定信号与随机信号之间有着密切的联系, 在一定条件下, 随机信号能表现出某种确定性。本书重点介绍确定信号的处理, 在此基础上, 对随机信号的处理也作必要介绍。

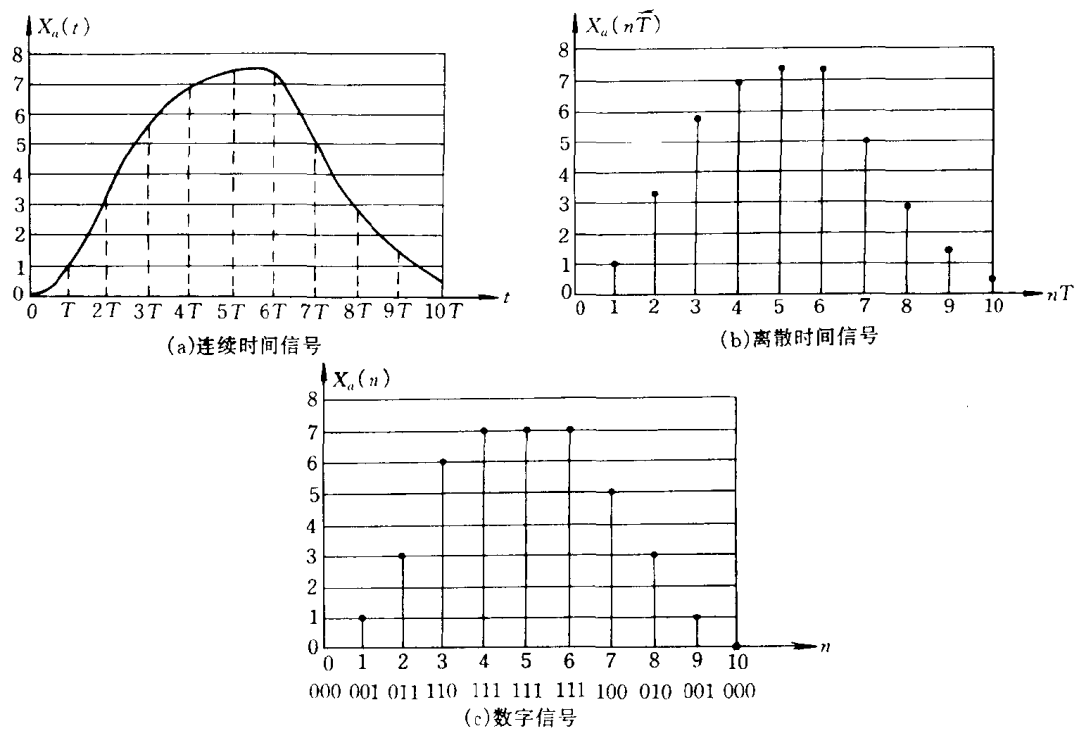


图 1.3 连续时间信号、离散时间信号和数字信号

1.1.2 系统

在信息科学领域内，系统可定义为对信号进行操作(或处理)的物理设备(装置)，或定义为反映信号处理因果关系的设备。如在信号处理中，一个重要的内容是从信号中滤除干扰和噪声，从而获得需要的有用信号。执行这种操作的设备是滤波器，故滤波器可称之为系统。然而应注意，系统是分层次(或多层次)的，一个大的复杂系统可以由若干子系统构成，其每个子系统还可再分为若干更低层次的子系统。例如在通信中，可以构成载波调制的多级子系统，从而组成一个大的通信系统，以提高系统的容量。

上述系统的定义仅包含对信号操作的物理设备，实际上，该定义还可进一步扩展将对信号的软件操作包含在内。如在数字计算机上对信号执行操作包含一些专门软件程序的数学计算，在此情况下，程序就代表了系统实现。

不难看出，上述对系统的定义仍是狭义的，因为这种定义仅对本学科领域的物理系统而言。在系统科学中有其广义的定义，即系统是由一些互相联系和制约的事物组成，并具有一定结构和性质的整体。由此定义出发，任何自然现象和社会现象都构成一个系统整体。它既可以是物理系统，如通信系统、计算机系统、自控系统、神经系统等等，也可以是社会系统，如财政金融系统、教育系统等等。

本书所讨论的系统局限于按本学科定义的狭义系统。由此出发，系统可以根据所处理信号的种类分为与之相对应的四种系统。

模拟信号系统：处理模拟信号，系统的输入和输出均为模拟信号。

连续时间系统：处理连续时间信号，系统的输入和输出均为连续时间信号。

离散时间系统：处理离散时间信号，系统的输入和输出均为离散时间信号。

数字系统：处理数字信号，系统的输入和输出均为数字信号。

一般系统的特性是由对信号所执行的操作(功能)确定的。若系统的操作是线性的,则称之为线性系统;若系统的操作是非线性的,则称之为非线性系统。此外,系统的特性也是由系统的参数决定的,若系统的参数不随时间(位移)而变化,则称之为时(移)不变系统等等。

1.1.3 信号处理

信号处理是研究对载有信息的信号进行操作、加工(或处理)以获得所希望的信息(或信号)的一门科学。从信息的观点看,信号处理涉及两个基本任务:一是信息的重新排列,例如图像增强,图像去模糊、谱分析等;另一是信息的压缩,将无关紧要的信息去掉,提取最有用的信息,以达到信息的经济有效地传输和利用。例如语声和图像处理中的压缩编码,除去原信号中无关紧要的信息后,可用比原信号低的速率获得需要的信息。

从技术观点看,信号处理有两种基本方法:一是滤波,滤除信号中不需要的分量(包括各种干扰),例如在单边带通信系统中,应用滤波方法抑制带外的频率分量;另一是分析(或变换),对信号进行各种方法的分析,得出信号中携带信息的各种参数,或者用变换方法,如离散傅里叶变换,对信号进行频谱分析,从而确定信号中有效信息的分布等。由此可见,通常信号处理的内容包括检测、滤波、变换、谱分析、参数估计、调制及识别等。

在科学和工程中遇到的多数信号是自然界的模拟信号,在本世纪 60 年代以前,一直用模拟方法进行信号处理,称为模拟信号处理。图 1.4 表示信号以模拟形式直接处理,若对信号进行滤波操作,则模拟信号处理器就是模拟滤波器,它可以是无源 LC 滤波器或有源滤波器等。

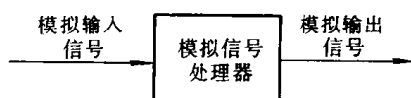


图 1.4 模拟信号处理

模拟信号处理的优点是直观实时。如两个模拟信号的相加或相乘运算几乎能即时完成。缺点是所用元器件的体积太大,难以做到高精度,且易受环境条件变化的影响,不易达到很高的技术指标要求等。

60 年代初期,用数字系统来模仿模拟系统的想法开始出现,随之创立了离散时间系统的理论,使得一维数字信号处理的各种方法得到发展。70 年代后,由于微电子集成电路及数字计算机的飞速发展,使信号的数字处理技术随之得到很大的发展,许多通用的方法,已成为数字方法所特有,而没有与其等效的模拟方法。因此,信号的数字处理技术即数字信号处理,已成为当今信息处理领域中最具活力的一门新兴技术。

1.2 数字信号处理系统

1.2.1 数字信号处理系统的构成

数字信号处理设备虽然执行的是数字方式,但决不是只处理数字(或离散时间)信号,而更重要的是处理自然界中大量存在的模拟(或连续时间)信号。因而数字信号处理系统的构成除了数字信号处理器外,还需要有模拟信号和数字信号之间的接口,即模/数(A/D)变换器,A/D 变换器的输出是数字信号,作为适合于数字处理器的输入。数字信号处理系统的构成框

图如图 1.5 所示。

图 1.5 中的数字信号处理器可以是大型的可编程数字计算机，或是小型的微处理机，通过编程软件对输入信号执行所希望的操作，故这种方式通常称之为数字



图 1.5 数字信号处理系统的框图

信号处理的软件实现。另一种方式是用硬连线的数字处理器(硬件)构成对输入信号的一组专门操作，通常称之为硬件(或硬连线)实现。软件实现可通过编程提供改变信号处理操作的灵活性，具有通用性；而硬件实现对已固化了的设备要重新结构则很困难，但当信号处理的操作已经优化确定时，硬件实现能得到较经济的信号处理器，且其工作速度比对应的可编程软件设备快。因而，在实际上可根据对信号处理的具体情况，选择一种最为合适的实现方式。

对于实际应用的数字信号处理系统，是否需要数字和模拟之间的接口，数/模(D/A)变换器，如图 1.5 中所示，则应视处理的对象而定。如在语声信号处理中必须提供 D/A 变换器，用于数字域到模拟域的变换。而当要求输出信号是数字形式时，则不需要 D/A 变换器，如雷达信号处理，从雷达信号中提取飞机位置和速度的信息，可以显示在荧光屏上，或打印在纸上，因而用不着 D/A 变换器。

1.2.2 数字信号处理的优越性

模拟信号的数字处理比起直接在模拟域中处理有许多优越性，它不仅可以克服前面提到的模拟信号处理的缺点，而且还有其独特的优点。

① 系统的灵活性 数字可编程系统允许灵活的重新组织数字信号处理的操作，这只需简单地改变程序就行了。而重新组织一个模拟系统，通常需要重新设计硬件，还要进行测试和调整才能正常工作。此外，有些数字系统的性能只取决于乘法器的系数，如数字滤波器，因此只要改变存储于存储器中的系数值，就能得到新的所要求的数字系统。再有，系统的灵活性还表现在数字信号的易存储上，由于数字信号能无损地存储在磁盘或光盘上，因而可随时传送，使得可进行远端的脱机处理。

② 系统的高精度 精度的高低是信号处理系统中十分重要的技术指标。模拟信号处理系统由于其元器件自身的容差大，使设计者要控制处理的精度，并达到较高的要求特别困难。而数字系统则能提供非常好的精度控制。如模拟系统中元件(电感、电容、电阻等)的精度难以达到 10^{-3} 以上的数量级，而在数字系统中达到远高于 10^{-3} 以上的精度也不困难，且在高精度的系统中，有时只能采用数字系统才能满足精度的要求。

③ 系统的可靠性强 在数字处理系统中，信号只有“0”、“1”两个电平，不易受噪声和环境条件变化的影响。而模拟系统中各元件参数都有一定的温度系数，易受温度、湿度等环境条件的变化影响。此外，数字系统采用大规模或超大规模集成电路，其故障率远低于采用分立元件构成的模拟系统。

④ 易进行高复杂度的操作 数字信号处理的方法允许实现非常复杂的信号处理算法，且能进行精确的数学运算。如在模拟系统中难以执行的高度复杂和精确的数学求解，在数字计算机上用软件实现是很容易的。

⑤ 系统易于大规模集成 数字部件具有高度的规范性，便于大规模集成，大规模生产，

特别是随着微电子科学技术的迅速发展,集成度越来越高,产品的成品率不断提高,使得集成电路的体积小、重量轻、性能强,而且成本日趋下降,这正显示出数字信号处理对模拟信号处理的突出优越性。

正是由于数字信号处理具有上述众多的优点,它已经在现代科学技术的许多领域内获得广泛的应用,如声音及图像处理、通信、雷达、地震测量、地球物理学、生物医学、石油探测以及处层空间的信号处理等。

需要指出,数字信号处理也有其自身的局限性,在实际中,变换器和数字信号处理器的操作速度是受限的。当处理信号的带宽非常宽时,要求变换器具有与带宽相匹配的取样速率,及数字信号处理器有足够高的操作速率,因此,处理这样的模拟信号,可能超过了当今数字硬件工艺所能达到的水平而难以实现。

1.3 模/数(A/D)和数/模(D/A)变换

如上节所述,数字信号处理的对象主要是模拟信号,因而,首先需要将模拟信号变换为数字信号,即变换为有限精度的数字序列,然后才能进行数字处理,处理后的数字信号常需还原成模拟形式。完成输入和输出信号的这种转换,就是模/数(A/D)和数/模(D/A)变换器。在数字信号处理系统中,A/D和D/A变换器通常成为单独的处理设备,在商业上也有各种专门的A/D、D/A设备的商品,以满足不同信号处理的要求。

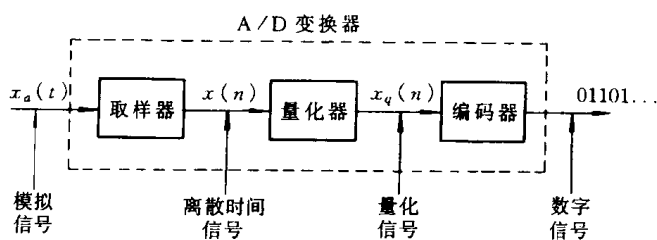


图 1.6 A/D 变换器的构成

A/D 变换可分三个步骤完成,其过程示于图 1.6 中。

① 取样:将连续时间信号变为离散时间信号,在各离散时刻上得到连续时间信号的样值,因此,若 $x_a(t)$ 是取样器的输入,则输出是 $x_a(nT) \equiv x(n)$, T 为取样间隔时间,常称 T 为取样间隔或取样周期。

② 量化:将离散时间连续幅值的信号 $x(n)$ 变为离散时间离散幅值的数字信号 $x_q(n)$ 。 $x(n)$ 和量化器的输出 $x_q(n)$ 之间的差值称为量化误差。

③ 编码:将每一个量化值 $x_q(n)$ 用 b 位二进制序列表示,便于在数字处理器中采用。

D/A 变换是对数字信号进行某种内插方式的连接以连接各样值的端点,从而得到近似的模拟信号,近似的程度决定于所采用的内插方式,图 1.7 表示一种简单的内插方式,称为零阶保持或阶梯近似。

可能的近似方式有多种,如线性连接逐个样值对的线性内插,通过三个相邻样值拟合的二次多项式内插等等。然而,什么内插函数是最优的?对于具有有限频率成分(有限带宽)的信号,根据本节将要介绍的取样定理,可以推导出最优的内插函数,因而,原则上能从样值

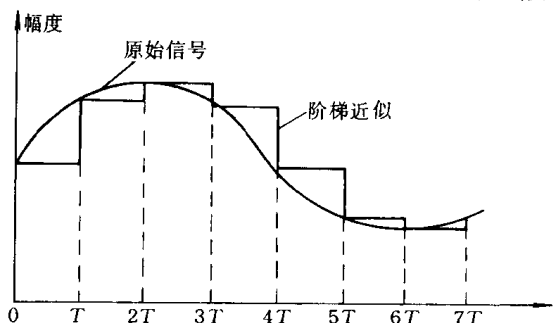


图 1.7 D/A 变换的零阶保持

中重新恢复模拟信号。

必须注意，由于量化是非可逆的或单向的处理，它会引起信号的失真，失真的大小取决于 A/D 变换器的精度。在实际中影响精度选择的因素是成本和取样速率，通常成本是随着精度和/或取样速率的提高而增加。

1.3.1 模拟信号的取样

模拟信号的取样有多种方法，用周期或均匀取样的方法应用最多，可用下式表示。

$$x(n) = x_a(nT) \quad -\infty < n < \infty \quad (1.3.1)$$

式中 $x(n)$ 是取样后的离散时间信号或取样信号，它是对模拟信号 $x_a(t)$ 每隔 T 秒取样得到，该过程示于图 1.8 中。 T 为取样周期，其倒数 $1/T = f_s$ 称为取样速率(每秒的样值数)或取样频率(Hz)。

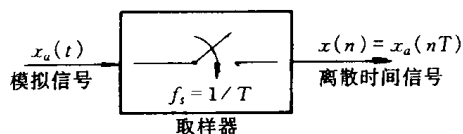


图 1.8 模拟信号的周期取样

周期取样建立了连续时间和离散时间信号之间变量的关系为

$$t = nT = n/f_s \quad (1.3.2)$$

若 $x_a(t) = A \cos(2\pi ft + \theta) = A \cos(\Omega t + \theta) \quad (1.3.3)$

则 $x_a(nT) \equiv x(n) = A \cos(\Omega nT + \theta) = A \cos(\omega n + \theta) \quad (1.3.4)$

于是 $\omega = \Omega T$, ω 与 Ω 之间是线性关系, Ω 为模拟角频率, ω 为数字角频率。 $(1.3.5)$

为了简化, 本书有时称 Ω 为模拟频率, ω 为数字频率, 与频率 f 在称呼上不加区别。由于 f 或 Ω 的变化范围为

$$-\infty < f < \infty; \quad -\infty < \Omega < \infty \quad (1.3.6)$$

对离散时间信号, 因 n 的变化范围是 $(-\infty, \infty)$, 所以由(1.3.4)看出, ω 及 Ω 的变化范围为

$$-\pi < \omega < \pi \quad -\frac{\pi}{T} < \Omega < \frac{\pi}{T} \quad (1.3.7)$$

可见, 连续时间信号和离散时间信号之间的主要区别是频率变量 Ω 和 ω 的变化范围。

离散时间信号的最高频率是 π , 取样频率为 f_s 时, 对应的 Ω 值为 Ω_m , Ω_m 与 f_s 的关系为

$$\Omega_m = \frac{\omega_m}{T} = \frac{\pi}{T} = \pi f_s \quad \text{或} \quad f_m = \Omega_m / 2\pi = f_s / 2 \quad (1.3.8)$$

于是, 当连续时间信号的频率大于 $f_s/2$ (Ω_m 或 $> \pi f_s$) 时, 取样处理将会产生信号的不确定性。下面举例说明。

设有两个正弦信号: $x_1(t) = A \sin(2\pi 10t)$ 和 $x_2(t) = A \sin(2\pi 50t)$

若取样频率 $f_s = 40\text{Hz}$, 得到的离散时间信号或序列为

$$x_1(n) = A \sin\left(2\pi \frac{10}{40}n\right) = A \sin\left(\frac{\pi}{2}n\right) \quad x_2(n) = A \sin\left(2\pi \frac{50}{40}n\right) = A \sin\left(\frac{5}{2}\pi n\right)$$

由于 $\sin\left(\frac{5\pi}{2}n\right) = \sin\left(\frac{\pi}{2}n\right)$, 故 $x_2(n) = x_1(n)$, 两个离散正弦信号相同。原来 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 是两个不同频率的正弦信号, 取样后, 得到两个没有区别的离散时间信号, 即产生了信号的不确定性, 其原因是 $x_2(t)$ 的频率 $f_2 > f_s/2$, 取样以后的数字频率 ω_2 变成了 ω_1 。我们称 ω_2 是 ω_1 的混叠, 或称 $f_2 = 50\text{Hz}$ 是 $f_1 = 10\text{Hz}$ 的混叠。