

经典教材改版，历经4个版本，已畅销20多年，销量超80万册

经典版

数字信号处理教程

(第四版)

程佩青 编著



清华大学出版社



经典版

数字信号处理教程

(第四版)

程佩青 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统地讨论了数字信号处理的基础理论、基本概念、基本分析方法、算法、设计。全书共9章,包括四个部分。第一部分是离散时间信号(序列)与系统的时域、频域的分析,包括第1、2章的内容;第二部分是离散傅里叶变换及其快速算法,包括第3、4章的内容;第三部分是IIR及FIR数字滤波器的理论、结构与算法,包括第5~7章的内容;第四部分是多抽样数字信号处理的基础理论以及数字滤波器实现中的有限字长效应,包括第8、9章的内容。

本书以条目式方法论述,条理清晰,内容充实,讨论全面,深入浅出,并有大量的例题和习题,便于教学,便于自学。

本书可作为大学本专科院校通信工程、信息工程、电子信息工程、自动控制等专业的教材,也可供从事这些专业及相近的理工科专业的科学研究和工程技术人员作为参考书。

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

数字信号处理教程:第四版:经典版/程佩青编著.--北京:清华大学出版社,2015

ISBN 978-7-302-40571-9

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第145764号

责任编辑:文 怡

封面设计:常雪影

责任校对:白 蕾

责任印制:杨 艳

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:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:33.75 字 数:819千字

版 次:2015年8月第1版 印 次:2015年8月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:49.50元

经典版前言

随着信息、通信、计算机科学与技术的迅速发展,数字信号处理已成为各大专院校相关专业的专业基础必修课程。作者所著《数字信号处理教程》多年来被许多高校采用,受到读者认可。为使教材内容更加充实完善,表达方式更便于教学,便于自学,便于掌握和应用,作者决定对第三版教材进行修订和改写,形成本教材——第四版(经典版)。作者认为数字信号处理课程的核心内容应是“一个基础,两个支柱”,一个基础是离散时间信号与离散时间系统的时域与频域的分析,两个支柱是离散傅里叶变换及其快速算法以及数字滤波器的理论和设计。本书的指导思想是围绕这个核心内容,对第三版教材进行充实和补充。具体修改如下:

1. 最重要的是在编写方式上做了全面及重大的改变,即在全书的论述中都采用将内容分条目(1,2,…)的论述方式,使得脉络更加清晰;同时,对以基础理论、概念及基本分析方法为主的前5章又加注了“学习重点”的提示。这样的处理方式,可使读者在学习(包括自学)时感到更加顺畅,更容易掌握内容。

2. 对每章内容,尤其是对核心部分的三章(第3,6,7章)内容,都按上述核心内容要求,分别作了归纳、补充、整理、改动,使得其内容更加充实、完整,论述更加流畅、透彻。

(1) 第1章 离散时间信号与系统。补充了相关性及其计算方法的内容,同时重点讨论了线性卷积和线性相关,并分别用一小节来论述;增加了利用向量-乘法进行有限长序列卷积计算的内容,这极有利于编程运算;重点讨论了数字频率 ω 这一基本概念;增加带通信号的抽样一小节;增加了能量信号与功率信号的描述。

(2) 第2章 z 变换与离散时间傅里叶变换(DTFT)。补充了单边 z 变换下的移位,同时增加了利用 z 变换求解差分方程一小节,讨论了利用单边 z 变换求系统的零输入响应、零输入状态;改写了傅里叶变换的对称性,使读者理解时变得更为流畅;对模拟信号、理想抽样、信号、序列及它们的频率域、复频率域(s 域、 z 域)之间的关系作了归纳。作者认为,归纳和综合也是一种重要的学习方法。

(3) 第3章 离散傅里叶变换(DFT)。增加了用矩阵表示DFT的内容,有利于编程计算;深入讨论了DFT(通过FFT算法)在计算线性卷积、线性相关上的应用;全面深入讨论了DFT在模拟信号频谱分析上的应用,包括参量的选择,频率分辨率的定义及其与其他参量的关系,处理过程中可能产生的三种误差(失真)以及解决办法。

(4) 第4章 快速傅里叶变换(FFT)。给出了重叠相加法和重叠保留法的FFT实现步骤。

(5) 第5章 数字滤波器的基本结构。为适应MATLAB上的编程要求,将一些结构

参数的表示方法做了调整,对各种结构的特点做了更深入的讨论。

(6) 第6章 无限长单位冲激响应(IIR)数字滤波器设计方法。对本章大部分内容都做了改写、完善和充实,主要有:对最小相位系统及全通系统补充了很多重要内容,对它们的特点和应用做了深入的改写、论述,增加了对切贝雪夫Ⅱ型滤波的分析与设计方法的论述;增加了“模拟频域频带变换”一节内容;讨论了三种IIR数字滤波器设计方案,给出实用的设计步骤和清晰的设计流程图。

(7) 第7章 有限长单位冲激响应(FIR)数字滤波器设计方法。对窗函数法设计线性相位FIR滤波器进行了改写和充实,增加了“理想低通、带通、带阻、高通的线性相位数字滤波器的表达式”一小节,以便于设计;对窗函数设计线性相位微分器及希尔伯特变换器(90° 移相器)这一小节全部做了改写,并做了较深入的讨论,完善和补充了很多内容和例子;在频率抽样法设计线性相位FIR滤波器中增加了一节设计步骤及举例的内容;此外,对这一章还做了不少补充和改写。

(8) 第8章 序列的抽取与插值——多抽样率数字信号处理基础。在单级及多级抽取论述中,给出了各级防混叠滤波器技术指标的分配方案。

(9) 考虑到FFT作为计算工具已有成熟的标准模块,故删除第4章FFT中基-4及分裂基算法,但作为科技工作者,对一些重要技术问题,不但要知结果,更要知如何得到这个结果,因而仍保留第4章中其他FFT算法的分析;将第9章中IIR滤波器的定点运算中的溢出振荡及FFT算法的有限字长效应两部分删除。

3. 增加了大量例题,覆盖面更广,凡是设计方面的内容,都有一个或多个例题,这对理解、消化和掌握课程内容,掌握分析和设计方法都很有助益。

4. 适应教材内容的充实和完善,各章习题都有一定的改动和补充,补充了一些必须用MATLAB来实现的习题。习题量增加了14%,提供给读者更多的练习机会和选择余地。

全书共有9章,可分为四个部分。

第一部分是第1章和第2章。此两章是数字信号处理的最基础内容,即上面提到的一个基础。它引出了一系列基本概念,例如数字频率、频谱混叠、常用典型序列、线性移(时)不变系统、因果性、稳定性、抽样等;也涉及一些基本方法,例如相关函数、卷积和、零极点分析、周期序列与非周期序列的傅里叶变换、 z 变换及 z 反变换等。

第二部分是第3章和第4章。离散傅里变换(DFT)是数字信号处理的两大支柱之一,它不仅是重要的理论支柱,也是许多领域的技术支撑和重要工具,起着“承前启后”的作用,在线性滤波、相关分析,尤其是谱分析时都是极为重要的工具。本书对DFT的基本理论、性质、特点及应用都做了较深入的论述。DFT的重要性还在于它有行之有效的快速算法FFT的帮助。

第三部分是第5~第7章,这三章是数字信号处理的另一大支柱,讨论的是数字滤波器设计内容,同样,数字滤波器不但有重要的理论意义,而且在实际应用中有主要的价值。这三章讨论了IIR及FIR数字滤波器的基本结构、IIR滤波器三种设计方法,讨论了各种模拟

滤波器之间、数字滤波之间以及它们两者之间的频带变换方法;讨论了线性相位 FIR 滤波器、微分器及希尔伯特变换器(90° 移相器)的三种设计方法,即窗函数法、频率抽样法及最优 Park-McClellan 算法。

第四部分是第 8 和第 9 章。第 8 章讨论多抽样率数字信号处理的基础知识,包括抽取、插值及有理数抽样率变换基本理论及其流图结构,变抽样率的多级实现等。抽样率转换用于多种媒体传输中以及其他一些希望改变抽样频率的应用中。第 9 章讨论数字信号处理的有限字长效应,包括 A/D 变换,系数,以及运算中的有限字长效应。这两章标上“*”号,是供选择的内容。

本书的主要特点是主要和重要的内容讨论全面深入,内容充实,逻辑性强,条目脉络清晰,深入浅出,有大量的精选例题,便于教、便于学,尤其便于自学;配合 177 道习题另有《数字信号处理教程习题分析与解答(第 4 版)》一书,可作为解题时的提示和校对工具。

考虑到有不少院校(包括使用过本书第三版的部分院校)在学习本课程之前已经学过 MATLAB,因而本书没有包含 MATLAB 的内容。本书第四版(经典版)在论述方式,内容充实度,讨论深度,例题的精选度上都完全优于第三版教材,而且更适于教学、自学。因此,作者认为它更适于这些院校使用。

期望本教材对相关读者有更大的帮助,并受到读者的欢迎。

本书在编写过程中参考了一些文献(见书后所列“参考文献”)的编写思路,参考或采用了其中一些内容的思路、例题和习题,特此向这些文献的作者致以衷心的感谢。

限于作者水平,书中定有不妥之处,恳切欢迎广大读者批评指正。

本书的建议学时为 54 或 64 两种,书中有“*”部分内容视各院校情况可选学或不学。作者认为教学大纲要求的内容并不是全要讲授的,有的要求应该由学生自学来掌握。

作者

2015 年 6 月

目 录

绪论	1
第 1 章 离散时间信号与系统	6
1.1 离散时间信号——序列	6
1.1.1 离散时间信号——序列	6
1.1.2 序列的运算	7
1.1.3 序列的卷积和	9
1.1.4 序列的相关性	16
1.1.5 几种常用典型序列	20
1.1.6 序列的周期性	23
1.1.7 用单位抽样序列表示任意序列	24
1.2 线性移不变系统	25
1.2.1 离散时间线性系统	25
1.2.2 离散时间移不变系统	27
1.2.3 离散时间线性移不变系统(LSI 系统)	28
1.2.4 因果系统	30
1.2.5 稳定系统	32
1.3 常系数线性差分方程	33
1.4 连续时间信号的抽样	39
1.4.1 模拟信号的抽样	39
1.4.2 时域抽样定理	41
*1.4.3 带通信号的抽样	43
*1.4.4 连续时间信号 $x_a(t)$ 、理想抽样信号 $\hat{x}_a(t)$ 以及 抽样序列 $x(n)$ 的关系	45
1.4.5 时域信号的插值重构	46
*1.4.6 实际抽样	48
1.4.7 正弦型信号的抽样	48
习题	50

第 2 章 z 变换与离散时间傅里叶变换(DTFT)	53
2.1 序列的 z 变换	53
2.1.1 z 变换的定义	53
2.1.2 z 变换的收敛域	53
2.1.3 4 种典型序列的 z 变换的收敛域	54
2.1.4 z 反变换-围线积分法(留数法),部分分式法及长除法(幂级数法)	60
2.1.5 z 变换的性质与定理	70
2.1.6 利用 z 变换求解差分方程	85
2.2 离散时间傅里叶变换(DTFT)——序列的傅里叶变换	87
2.2.1 序列傅里叶变换定义	88
2.2.2 序列傅里叶变换的收敛性——DTFT 的存在条件	88
2.2.3 序列傅里叶变换的主要性质	91
2.2.4 序列及其傅里叶变换的一些对称性质	94
2.2.5 周期性序列的傅里叶变换	98
2.3 $x_a(t)$ 、 $\hat{x}_a(t)$ 、 $x(n)$ 以及它们的拉普拉斯变换、 z 变换、傅里叶变换之间的 关系, s 平面到 z 平面的映射	105
2.4 离散线性移不变(LSI)系统的频域表征	109
2.4.1 LSI 系统的描述	109
2.4.2 LSI 系统的因果、稳定条件	110
2.4.3 LSI 系统的频率响应 $H(e^{j\omega})$ 的特点	111
2.4.4 频率响应的几何确定法	112
2.4.5 无限长单位冲激响应(IIR)系统与有限长单位冲激 响应(FIR)系统	114
习题	118
第 3 章 离散傅里叶变换(DFT)	122
3.1 傅里叶变换的四种可能形式	122
3.2 周期序列的傅里叶级数——离散傅里叶级数(DFS)	122
3.2.1 DFS 的定义	122
3.2.2 DFS 的性质	128
3.3 离散傅里叶变换(DFT)——有限长序列的离散频域表示	131
3.3.1 DFT 的定义、DFT 与 DFS、DTFT 及 z 变换的关系	131
3.3.2 时域、频域都抽样后, f_k 、 f_s 、 N 的关系	136
3.3.3 DFT 隐含的周期性	137

3.4	DFT 的主要性质	137
3.4.1	线性	138
3.4.2	圆周移位性质	138
3.4.3	圆周共轭对称性质	139
3.4.4	圆周翻褶序列及其 DFT	141
3.4.5	对偶性	142
3.4.6	DFT 运算中的圆周共轭对称性	142
3.4.7	DFT 形式下的帕塞瓦定理	146
3.4.8	圆周卷积和与圆周卷积和定理	146
3.4.9	线性卷积和与圆周卷积和的关系	151
3.5	频域抽样理论	155
3.5.1	频域抽样与频域抽样定理	155
3.5.2	频域的插值重构	158
3.6	DFT 的应用	161
3.6.1	利用 DFT 计算线性卷积	161
3.6.2	利用 DFT 计算线性相关	161
3.6.3	利用 DFT 对模拟信号的傅里叶变换(级数)对的逼近	165
3.6.4	用 DFT 对模拟信号进行谱分析	169
3.6.5	用 DFT 对模拟信号作谱分析中主要参量的选择	169
3.6.6	用 DFT 对模拟信号作谱分析时的几个问题	170
	习题	181
第 4 章	快速傅里叶变换(FFT)	186
4.1	直接计算 DFT 的运算量,减少运算量的途径	186
4.2	按时间抽选(DIT)的基-2 FFT 算法(库利-图基算法)	187
4.3	按频率抽选(DIF)的基-2 FFT 算法(桑德-图基算法)	195
4.4	DIT-FFT 与 DIF-FFT 的异同	199
4.5	离散傅里叶反变换(IDFT)的快速算法 IFFT	199
4.6	基-2 FFT 流程图	201
*4.7	N 为复合数的 FFT 算法——混合基(多基多进制)FFT 算法	204
4.8	线性调频 z 变换(Chirp- z 变换或 CZT)算法	209
4.9	利用 FFT(用分段处理方法)计算线性卷积	215
4.9.1	重叠相加法	216
4.9.2	重叠保留法	217
4.10	利用 FFT 算法计算线性相关	222

习题	223
第 5 章 数字滤波器的基本结构	226
5.1 引言	226
5.2 无限长单位冲激响应(IIR)滤波器的基本结构	227
5.2.1 IIR 滤波器的特点	227
5.2.2 直接型结构	227
5.2.3 级联型结构	228
5.2.4 并联型结构	230
5.2.5 转置型结构	231
5.3 有限长单位冲激响应(FIR)滤波器的基本结构	234
5.3.1 FIR 滤波器的特点	234
5.3.2 直接型(横截型、卷积型)结构	235
5.3.3 级联型结构	236
5.3.4 频率抽样型结构	236
5.3.5 快速卷积结构	242
5.3.6 线性相位 FIR 滤波器的结构	242
*5.4 数字滤波器的格型(格型梯形)结构	249
5.4.1 全零点系统(FIR 系统,滑动平均(MA)系统)的格型结构	250
5.4.2 全极点系统(IIR 系统,自回归(AR)系统)的格型结构	253
5.4.3 零-极点系统(IIR 系统,自回归滑动平均(ARMA)系统)的 格型梯形结构	257
习题	260
第 6 章 无限长单位冲激响应(IIR) 数字滤波器设计方法	264
6.1 数字滤波器的基本概念	264
6.2 数字滤波器的技术指标	267
6.3 全通滤波器	269
6.4 最小相位滞后滤波器	273
6.4.1 最小相位系统、混合相位系统、最大相位系统及它们与 全通系统的关系	273
6.4.2 最小相位系统的性质	275
6.4.3 利用最小相位系统的逆系统来补偿幅度响应的失真	278
6.5 模拟原型低通滤波器设计	280
6.5.1 引言	280

6.5.2	模拟巴特沃思低通滤波器	281
6.5.3	模拟切贝雪夫 I 型、II 型低通滤波器	286
*6.5.4	椭圆函数(考尔)低通滤波器简介	295
6.5.5	四类模拟滤波器的比较	297
6.6	模拟频域频带变换	307
6.6.1	从归一化模拟低通滤波器到模拟低通滤波器的变换	307
6.6.2	从归一化模拟低通滤波器到模拟高通滤波器的变换	308
6.6.3	从归一化模拟低通滤波器到模拟带通滤波器的变换	309
6.6.4	从归一化模拟低通滤波器到模拟带阻滤波器的变换	310
6.7	间接法的 IIR 数字滤波器设计方案	315
6.8	模拟滤波器到数字滤波器的映射方法	316
6.8.1	冲激响应不变法(脉冲响应不变法)	317
6.8.2	双线性变换法	319
6.9	数字滤波器设计的第一种方案	324
6.10	模拟低通滤波器到四种通带数字滤波器的直接变换	332
6.10.1	模拟低通→数字带通	332
6.10.2	模拟低通→数字带阻	334
6.10.3	模拟低通→数字高通	335
6.11	数字滤波器的第二种设计方案	337
6.12	数字频域频带变换	343
6.12.1	数字频域频带变换的基本要求	343
6.12.2	数字低通→数字低通	344
6.12.3	数字低通→数字高通	346
6.12.4	数字低通→数字带通	348
6.12.5	数字低通→数字带阻	350
6.12.6	数字低通→数字多通带	351
6.13	数字滤波器设计的第三种方案	354
	习题	362
第 7 章	有限长单位冲激响应(FIR)数字滤波器设计方法	367
7.1	引言	367
7.2	线性相位 FIR 数字滤波器的特点	367
7.2.1	线性相位条件	368
7.2.2	线性相位约束对 FIR 数字滤波器(DF)的单位冲激 响应 $h(n)$ 的要求	368

7.2.3	两类线性相位约束下, FIR 数字滤波器幅度函数 $H(\omega)$ 的特点	370
7.2.4	线性相位 FIR 滤波器的零点位置	376
7.3	窗函数设计法	378
7.3.1	窗函数设计法的设计思路	378
7.3.2	理想低通、带通、带阻、高通的线性相位数字滤波器的表达式	378
7.3.3	窗函数设计法的性能分析	381
7.3.4	各种常用窗函数	384
7.3.5	窗函数法偶对称单位冲激响应的线性相位 FIR DF 的设计步骤及举例	389
*7.3.6	窗函数法奇对称单位冲激响应的线性相位微分器及希尔伯特变换器的设计	400
7.3.7	窗函数设计法计算中的主要问题	411
7.4	频率抽样设计法	413
7.4.1	频率抽样设计法的基本思路	413
7.4.2	频率抽样的设计公式	414
7.4.3	频率抽样设计法的逼近误差及改进办法	417
7.4.4	频率抽样设计法的设计步骤及举例	418
7.4.5	频率抽样设计法存在的问题	422
*7.5	设计线性 FIR 滤波器的最优化方法	422
7.5.1	均方误差最小准则	422
7.5.2	最大误差最小化准则——加权切贝雪夫等波纹逼近	423
7.5.3	交错定理	427
7.5.4	最佳线性相位 FIR 滤波器设计算法	431
7.5.5	Parks-McClellan 算法	432
7.6	IIR 与 FIR 数字滤波器的比较	438
	习题	439
*第 8 章	序列的抽取与插值——多抽样率数字信号处理基础	442
8.1	概述	442
8.2	用正整数 D 的抽取——降低抽样率	443
8.3	用正整数 I 的插值——提高抽样率	449
8.4	用正有理数 I/D 做抽样率转换	452
8.5	抽取、插值以及两者结合的流图结构	459
8.5.1	抽取系统的直接型 FIR 结构	459
8.5.2	插值系统的直接型 FIR 结构	460

8.5.3	抽取和插值的线性相位 FIR 结构	461
8.5.4	抽取器的多相 FIR 结构	461
8.5.5	插值器的多相 FIR 结构	463
8.5.6	正有理数 I/D 抽样率转换系统的变系数 FIR 结构	465
8.6	变换抽样率的多级实现	469
	习题	475
*第9章	数字滤波器实现中的有限字长效应	479
9.1	引言	479
9.2	二进制数的表示及其对量化的影响	479
9.2.1	二进制的三种算术运算法	479
9.2.2	负数的表示法——原码、补码、反码	482
9.2.3	量化方式——舍入与截尾	486
9.3	模拟/数字(A/D)变换的量化效应	492
9.3.1	A/D 变换的非线性模型	492
9.3.2	A/D 变换对输入抽样信号幅度的要求	493
9.3.3	A/D 变换的量化非线性特性	493
9.3.4	A/D 变换量化误差的统计分析	494
9.3.5	量化噪声的功率谱密度	496
9.4	白噪声(A/D 变换的量化噪声)通过线性系统	496
9.5	数字滤波器的系数量化效应	498
9.5.1	系统极点(零点)位置对系统量化的灵敏度	498
9.5.2	系数量化对二阶子系统极点位置的影响	501
9.5.3	系数量化效应的统计分析	504
9.6	数字滤波器运算中的有限字长效应	510
9.7	防止溢出的幅度加权因子	514
9.8	IIR 滤波器的定点运算中零输入的极限环振荡	516
	习题	519
	参考文献	523

绪 论

随着信息学科以及大规模集成电路、超大规模集成电路和软件开发引起的计算机学科的飞速发展,自1965年快速傅里叶变换算法^[8]提出后,数字信号处理迅速发展成为一门新兴的独立的学科体系,这一学科已经应用于几乎所有工程、科学、技术领域,并渗透到人们日常生活和工作的方方面面。

数字信号处理是利用计算机或通用(专用)的信号处理设备,采用数值计算的方法对信号进行处理的一门学科,包括滤波、变换、压缩、扩展、增强、复原、估计、识别、分析、综合等加工处理,以达到提取有用信息、便于应用的目的。

数字信号处理应理解为对信号进行数字处理,而不应理解为只对数字信号进行处理,因而它既能对数字信号进行处理,又能对模拟信号进行处理,当然这时要将模拟信号转换成数字信号。

信号是信息的物理表现形式,或定义为携带信息的函数,信息则是信号的具体内容。根据载体的不同,信号可以分为电、声、光、磁、机械、热、生物医学等各类信号;信号表现上可分为任意时刻能精确确定信号取值的确定性信号以及任意时刻不能精确确定(随机)信号取值的随机信号;信号的自变量可以是时间,或是频率、空间或其他物理量,按自变量数划分,可以有一维的(多数是以时间或频率表示)或二维的(例如空间的 x, y 坐标)或多维的(例如流媒体电视信号 x, y 坐标及时间 t);还有其他的划分方法,例如周期信号与非周期信号,功率信号与能量信号等。

本书要讨论的是一维的确定信号处理问题的原理和实现方法,及其一些基本应用。作者认为,二维数字信号处理及随机信号处理属于后续选修课程及研究生课程范围。

绝大多数一维信号是时间的函数,按时间(自变量)、幅度(因变量)划分又有四种信号:

(1) 连续时间信号:时间连续的,幅度可以是连续的、也可以是离散的信号。

(2) 模拟信号:时间连续、幅度也连续的信号,当不与数字信号并用时,常与连续时间信号通用,本书中就常这样采用。

(3) 离散时间信号:时间离散、幅度连续的信号,又称抽样信号或序列,可以看成是对模拟信号的等间隔抽样信号(我们不研究非等间隔抽样)。

(4) 数字信号:时间离散、幅度也离散(称为量化)的信号,其幅度是按二进制编码量化,可以看成是对离散时间信号的幅度量化后的信号。即数字信号的幅度可用有限位(例如 b 位,一般 $b=6, 8, 10, 12, 16$ 等)二进制编码表示,若 $b=10$,则有 $2^{10}=1024$ 个量化层,层间间隔为 2^{-10} ,若信号峰值电压为 $-1\sim 1\text{V}$,则量化层的间隔为 $\frac{2}{2^{10}}\approx 1.95\times 10^{-3}\text{V}$,信号量

化后只能取各量化层上的值,幅度就“离散”化了。 $1.95 \times 10^{-3} \text{V}$ 是一个很小的数值,可以看出 b 越大,量化层间的间距越小,量化后误差就很小。

系统定义为按照人们的要求来处理信号的各种物理设备。实际上系统是完成某种运算(操作)的,因而还可把软件编程也看成是一种系统的实现方法。

一般只讨论直接处理模拟信号、离散时间信号、数字信号的三种系统,并将它们分别称为模拟系统、离散时间系统、数字系统。

一、数字信号处理的基本组成

图 0.1 是一个典型的以数字信号处理器为核心部件的数字信号处理系统框图,此系统既可处理数字信号,也可处理模拟信号。

当用此系统处理数字信号时,可直接将输入数字信号 $x(n)$ 送入数字信号处理器由它来按人们需要进行处理后,直接从它的输出端得到输出的数字信号 $y(n)$,如图 0.1 所示。这时,并不需要图上的其他部件。

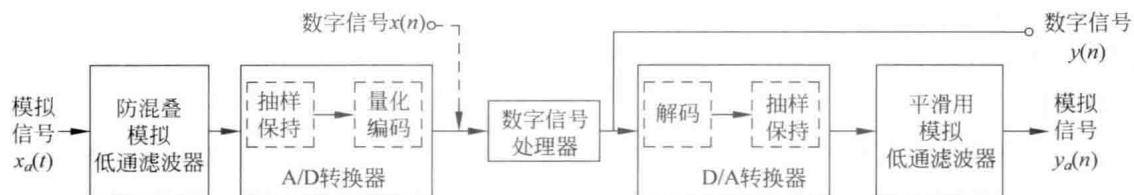


图 0.1 数字信号处理系统的框图

当用此系统处理模拟信号时,需采用图上的所有部件。模拟信号 $x_a(t)$ 先要通过一个防混叠的模拟低通滤波器,把会造成混叠失真的高频分量加以滤除(见第 1 章的讨论)。然后进入模拟-数字转换器(A/D 转换器)将模拟信号转换成数字信号,A/D 转换器包括了抽样保持及量化编码两部分。由于量化编码不能瞬时完成,所以抽样保持既要模拟信号进行抽样(时间离散化)又要将抽样的幅度保持以便完成量化编码,量化编码将送入的抽样保持信号的幅度加以量化并形成二进制编码信号(数字信号)。随后送入数字信号处理这一核心部件处理后,得到数字信号。若所需为数字信号则可直接送出;若需要送出模拟信号,则如图 0.1 所示,需后接一个数字-模拟转换器(D/A 转换器),它包括解码及抽样保持两部分内容,它的输出为阶梯形的连续时间信号(当用零阶保持电路时),需要再送入图上的平滑用模拟低通滤波器以得到光滑的所需输出模拟信号 $y_a(t)$ 。

数字信号处理是利用数字系统对数字信号(包括数字化后的模拟信号)进行处理,离散时间信号处理是用离散时间系统对离散时间信号进行处理,二者的差别是,数字信号处理既要离散时间信号加以幅量化得到数字信号,又要离散时间系统的系数(参数)加以量化得到数字系统。如果将“量化”这一部分专门进行分析论述,则讨论的内容主要涉及离散时间信号处理。从这一考虑出发,实际上,本书大部分内容是讨论离散时间信号处理——包括离散时间信号(序列)及离散时间系统,而“量化”问题主要是在第 9 章数字“滤波器实现中

的有限字长效应”(即量化效应)中进行论述。所以我们说,已经很成熟的离散时间信号与系统的理论是数字信号处理的重要理论基础。

二、数字信号处理学科概貌

一般学术界公认,1965年FFT(快速傅里叶变换算法)的问世是数字信号处理这一新学科发展的开端,这一算法的提出,开辟了学科发展的极其广阔的前景。

数字信号处理和许多学科紧密相关,数学的重要分支微积分、概率论与随机过程、复变函数、高等代数及数值计算等都是它的极为重要的分析工具;而网络理论、信号与系统则是其理论基础,它与很多学科领域,例如通信理论、计算机科学、大规模集成电路与微电子学、消费电子、生物医学、人工智能、最优控制以及军事电子学等结合都很紧密,并对它们的发展起着主要的促进作用。

总之,数字信号处理已形成一个和国民经济紧密相关的独立的、完整的学科理论体系,这个学科体系主要包括以下的领域:

- (1) 离散时间信号的时域及频域分析,时域频域的抽样理论,离散时间傅里叶变换理论。
- (2) 离散时间线性时(移)不变系统时域及变换域(频域,复频域即 z 变换域)的分析。
- (3) 数字滤波技术。
- (4) 离散傅里叶变换及快速傅里叶变换、快速卷积、快速相关算法。
- (5) 多抽样率理论及应用。
- (6) 信号的采集,包括A/D转换器、D/A转换器、量化噪声等。
- (7) 现代谱分析理论与技术。
- (8) 自适应信号处理。
- (9) 信号的压缩,包括语言信号的压缩及图像信号的压缩。
- (10) 信号的建模,包括AR、MA、ARMA、CAPON、PRONY等各种模型。
- (11) 其他特殊算法,包括同态处理、信号重建、反卷积等。
- (12) 数字信号处理的实现。
- (13) 数字信号处理的应用。

由于本书是数字信号基础理论教材,不可能涉及那么多的理论内容,因而只着重讨论以上的前5条及第6条的量化噪声等内容,即只能给出这一领域的最基本的概念、理论和分析方法以及一些基本的设计方法,以期为读者进一步学习打下较扎实的基础,能够较方便地进入到新的更广阔的学习和研究领域。

三、数字信号处理的特点

1. 数字信号处理系统具有以下一些明显的优点:

(1) 精度高:模拟网络的精度由元器件决定,模拟元器件的精度很难达到 10^{-3} 以上,而数字系统只要14位字长就可达到 10^{-4} 的精度。在高精度系统中,有时只能采用数字系统。

由于数字信号可无损地存储在磁盘或光盘上,因而可随时传送,可在远端脱机处理。

另外,时间可倒置、压缩或扩张处理。还可以进行同态处理(模拟系统则不能)。

(2) 灵活性高: 数字系统的性能主要由乘法器的系数决定,而系数是存放在系数存储器中的,因而只需通过软件设计改变存储的系数就可得到不同的系统,比改变模拟系统方便得多。

由于工艺水平的提高,集成度越来越高,而且可运用的频率也越来越高。

(3) 可靠性强: 因为数字系统只有两个信号电平“0”和“1”,因而受周围环境的温度及噪声的影响较小。而模拟系统的各元器件都有一定的温度系数,且电平是连续变化的,易受温度、噪声、电磁感应等的影响。数字系统如采用大规模集成电路,其可靠性就更高。

(4) 容易大规模集成: 由于数字部件具有高度规范性,便于大规模集成、大规模生产,而且对电路参数要求不严,故产品成品率高。尤其是对于低频信号,例如,地震波分析需要过滤几赫兹到几十赫兹信号,用模拟网络处理时,电感器、电容器的数值、体积和重量都非常大,性能也不能达到要求,而数字信号处理系统在这个频率却非常优越。

(5) 时分复用: 时分复用就是利用数字信号处理器同时处理几个通道的信号,其系统的方框图见图 0.2。由于某一路信号的相邻两抽样值之间存在着很大的空隙时间,因而可在同步器的控制下,在此时间空隙中送入其他路的信号,而各路信号则利用同一个信号处理器,后者在同步器的控制下,算完一路信号后再算另一路信号。处理器的运算速度越高,能处理的信道数目也就越多。

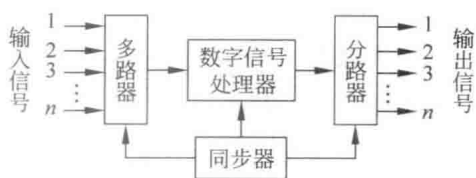


图 0.2 时分多路复用数字信号处理系统的方框图

(6) 可获得高性能指标: 例如对信号进行频谱分析,模拟频谱仪在频率低端只能分析到 10Hz 以上的频率,且难以做到高分辨率(足够窄的带宽);但在数字谱分析中,已能做到 10^{-3} Hz 的谱分析。又如,有限长冲激响应数字滤波器可实现准确的线性相位特性,这在模拟系统中是很难达到的。

(7) 二维与多维处理: 利用庞大的存储单元可以存储一帧或数帧图像信号,实现二维甚至多维信号的处理,包括二维或多维滤波、二维或多维谱分析等。

由于数字信号处理的突出优点,使得它在通信、语音、雷达、地震测报、声呐、遥感、生物医学、电视、仪器、军事中得到愈来愈广泛的应用。

2. 数字信号处理的局限性

(1) 系统复杂性高,成本高: 由于整个系统(如图 0.1 所示)有 A/D、D/A 转换器,防混叠及平滑两种滤波器,故系统复杂性较高,成本也高,因此在处理一般模拟信号时,成本嫌高,必须全面考虑。

另外高速、高精度 A/D、D/A 转换器成本也昂贵。

(2) 处理速度与精度的矛盾: 影响处理速度的因素是算法的速度, A/D、D/A 转换器的速度,以及数字信号处理器芯片的速度;而 A/D、D/A 转换器的速度和精度(dB 数)是互相