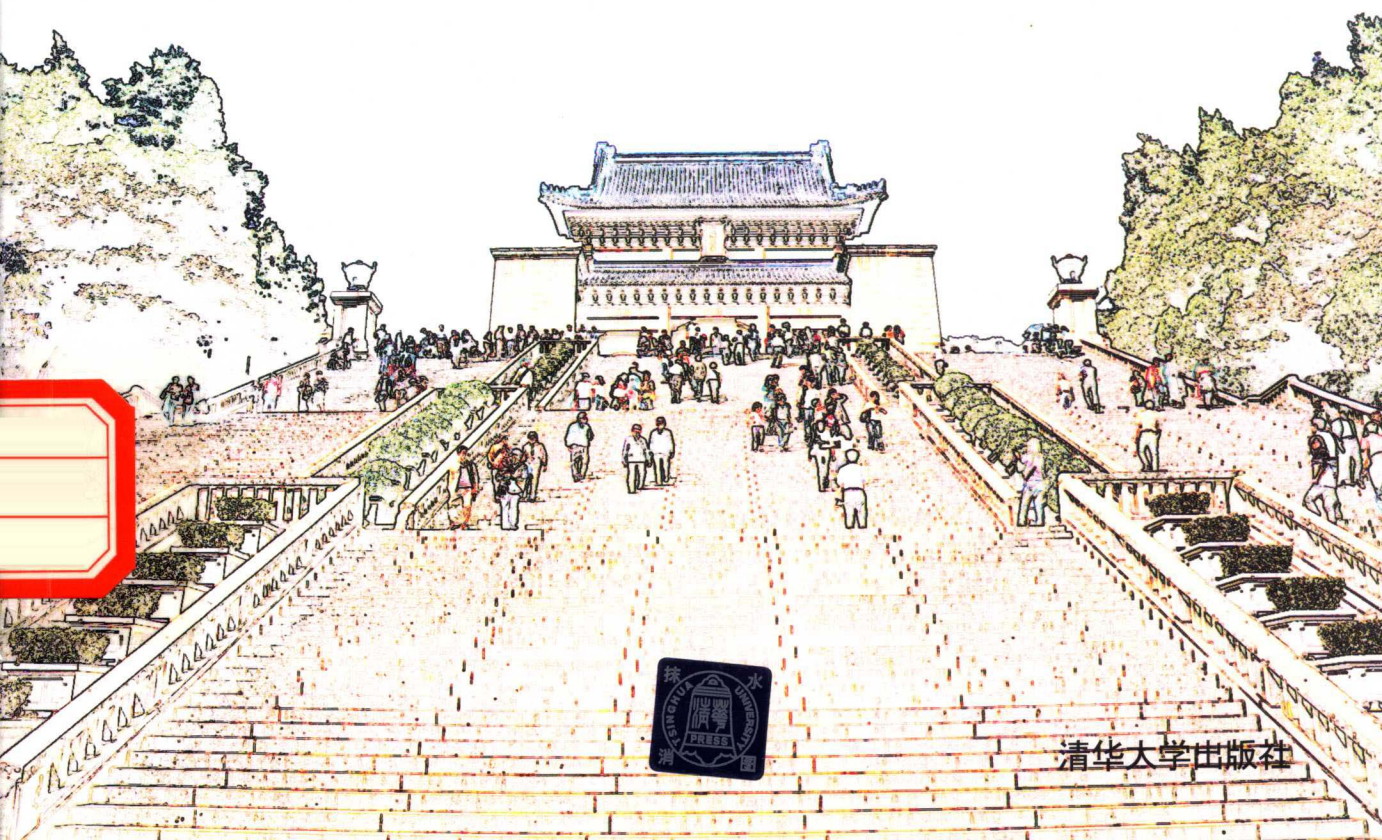


全国普通高校
电子信息与
电气学科
基础规划教材

数字信号处理

周先春 石兰芳 编著



清华大学出版社

全国普通高校电子信息与电气学科基础规划教材

数字信号处理

周先春 石兰芳 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

根据本课程的教学理念和实际教学效果,在广泛听取教师和学生意见的前提下,本书全面而又系统地介绍了数字信号处理的基本理论和基本方法,大量引入应用实例,将理论与应用相融合,在讲解理论知识的同时,增加了 MATLAB 的编程实例,结合实验,有利于加强学生对基本知识的理解,强化学生的工程应用能力,为培养创新型工程技术人才打下坚实的基础。本书在概述了数字信号、数字信号处理的基本知识以及结合 MATLAB 的信号系统分析方法之后,详细讨论傅里叶变换与分析,快速傅里叶变换及其应用,数字滤波器的基本结构、基本理论以及设计方法,最后介绍了数字信号处理中的有限字长效应和 DSP 的硬件开发。

本书概念清楚、系统性强、特色鲜明,尤其是现代教学思想与工具的引入,使本书的使用范围更宽。本书可作为高等院校通信、电子信息、自动控制、计算机科学等专业的教材,也可供从事数字信号处理工作的工程技术人员参考。

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/周先春,石兰芳编著.--北京:清华大学出版社,2015

全国普通高校电子信息与电气学科基础规划教材

ISBN 978-7-302-38733-6

I. ①数… II. ①周… ②石… 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(2014)第 284265 号

责任编辑:梁 颖 薛 阳

封面设计:傅瑞学

责任校对:时翠兰

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:保定市中国画美凯印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:20.75

字 数:502 千字

版 次:2015 年 8 月第 1 版

印 次:2015 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.00 元

产品编号:062351-01

前言

近年来,随着信息技术的发展,数字信号处理理论与技术日益成熟,数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)已成为当前科学和工程领域最为热门的技术之一,广泛应用于通信、雷达、声纳、医学成像和音视频压缩等许多领域,给人们的生产和生活带来了许多革命性的变化和影响。数字信号处理基础知识已成为通信、电子信息、计算机科学等专业学生必须掌握的专业基础知识和必修内容。

本书集作者多年对课程建设的探索和教学改革的实践经验,深入浅出地介绍了数字信号处理的基础知识、基本理论以及应用实例,基本做到理论与应用的交融,将经典的信号处理理论寓于工程实践,更有利于学生对概念的理解,同时培养了学生的应用能力。并在书中引入了 MATLAB 软件,增加了 MATLAB 的编程实例,突出了理论与实践的结合,着力培养学生解决实际问题的能力。

本书在第 1~第 7 章中,将与本章相关的 MATLAB 知识及应用程序集中在最后一节进行介绍,这样既可帮助读者结合实际应用,提高掌握 MATLAB 工具的兴趣和积极性,又可使基本理论与 MATLAB 软件部分相对独立。

本书每章都精选了丰富的习题和大量的模拟实验,可帮助学生理解、领会教学内容,增强分析问题和解决问题的能力。

本书概念清楚、系统性强、特色鲜明。尤其是现代教学思想与工具的引入,使本书的使用范围更宽。本书可作为通信、电子信息、自动控制、计算机科学等专业的教材。具体实施可根据专业要求对内容进行取舍。本书也可作为相关专业的工程技术人员的参考书。

本书第 1 章以及第 5、第 6、第 7、第 8 章主要由周先春编写,第 2、第 3、第 4 章主要由石兰芳编写。此外曾彬、嵇亚婷、张政参与编写了本书绘图,孙文荣、柏鹤对全部 MATLAB 模拟仿真程序进行了验证。汪美玲和王洁参与本书的编写校对工作。南京信息工程大学科技处的行鸿彦教授于百忙中审阅了本书,并提出了许多非常宝贵的意见。南京信息工程大学多年从事数字信号处理教学工作的裴晓芳副教授对初稿提出了建设性的意见。在本书的编写过程中,得到了南京信息工程大学教务处、电子与信息工程学院的大力支持,清华大学出版社的编校人员对本书的出版提出很多宝贵建议。作者在此一并致谢。

由于编者水平有限,书中不足与错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

作者电子邮箱:zhouxc2008@nuist.edu.cn。

作者

2015 年 2 月

绪论	1
第 1 章 离散时间信号和离散时间系统	8
1.1 引言	8
1.2 离散时间信号——序列	8
1.2.1 常用的典型序列	9
1.2.2 序列的运算	12
1.3 离散时间系统	13
1.3.1 线性系统	13
1.3.2 时不变系统	14
1.3.3 线性时不变系统输入与输出之间的关系	14
1.3.4 系统的因果性和稳定性	17
1.4 常系数线性差分方程	19
1.4.1 线性常系数差分方程	20
1.4.2 线性常系数差分方程的求解	20
1.5 模拟时间信号的抽样	22
1.5.1 抽样定理	23
1.5.2 抽样信号的恢复	26
1.6 信号图形、序列运算与频谱以及采样的 MATLAB 实现	29
习题	34
第 2 章 z 变换与离散时间傅里叶变换	37
2.1 引言	37
2.2 序列的 z 变换	37
2.2.1 z 变换的定义及收敛域	37
2.2.2 序列特性对收敛域的影响	38
2.2.3 z 反变换	41
2.2.4 z 变换的基本性质和定理	47
2.3 序列的 z 变换与连续时间信号的 Laplace 变换、Fourier 变换的关系	52
2.3.1 序列的 z 变换与理想抽样信号的 Laplace 变换的关系	52
2.3.2 序列的 z 变换与连续时间信号的 Fourier 变换的关系	54
2.4 利用 z 变换解差分方程	57
2.5 序列的傅里叶变换的定义及性质	58
2.5.1 序列的傅里叶变换的定义	58
2.5.2 序列的傅里叶变换的性质	59

2.6	利用 z 变换分析信号和系统的频域特性	66
2.6.1	传输函数与系统函数	66
2.6.2	用系统函数的极点分布分析系统的因果性和稳定性	66
2.6.3	利用系统的极零点分布分析系统的频率特性	67
2.7	z 变换和 z 逆变换以及离散时间傅里叶变换的 MATLAB 实现	71
	习题	72
第3章	离散傅里叶变换	77
3.1	引言	77
3.2	Fourier 变换的几种可能形式	77
3.3	周期序列的离散傅里叶级数及傅里叶变换表达式	79
3.3.1	周期序列的离散傅里叶级数	80
3.3.2	周期序列的傅里叶变换表达式	81
3.4	离散傅里叶变换的定义	84
3.4.1	DFT 的定义	84
3.4.2	DFT 和 z 变换的关系	85
3.4.3	DFT 的隐含周期性	85
3.5	离散傅里叶变换的基本性质	87
3.5.1	线性性质	87
3.5.2	循环移位性质	87
3.5.3	循环卷积定理	89
3.5.4	复共轭序列的 DFT	91
3.5.5	DFT 的共轭对称性	92
3.6	频率域采样	95
3.7	DFT 的应用举例	97
3.7.1	用 DFT 对连续信号进行谱分析	97
3.7.2	用 DFT 对序列进行谱分析	101
3.7.3	用 DFT 进行谱分析的误差问题	102
3.8	离散傅里叶变换的 MATLAB 实现	104
	习题	106
第4章	快速傅里叶变换	110
4.1	引言	110
4.2	直接计算 DFT 的问题及改进的基本途径	110
4.3	按时间抽选的基-2 FFT 算法	111
4.3.1	算法原理	111
4.3.2	运算量比较	114
4.3.3	DIT-FFT 算法的特点	114
4.4	按频率抽选的基-2 FFT 算法	117
4.5	离散傅里叶反变换的快速算法	120

4.6	进一步减少运算量的措施	122
4.6.1	多类蝶形单元运算	122
4.6.2	旋转因子的形成	123
4.6.3	实序列的 FFT 算法	123
4.7	任意基的快速傅里叶变换	124
4.8	基-4 FFT 算法	126
4.9	分裂基 FFT 算法	128
4.9.1	分裂基 FFT 算法原理	128
4.9.2	分裂基 FFT 算法的运算量	133
4.9.3	分裂基 FFT 算法程序及说明	134
4.10	线性调频 z 变换算法	136
4.11	线性卷积与线性相关的 FFT 算法	140
4.11.1	线性卷积的 FFT 算法	140
4.11.2	线性相关的 FFT 算法	145
4.12	快速傅里叶变换的 MATLAB 实现	146
	习题	148
第 5 章	数字滤波器的基本结构	150
5.1	数字滤波器结构的表示方法	150
5.2	无限长单位冲激响应滤波器的基本结构	152
5.2.1	直接 I 型结构	152
5.2.2	直接 II 型结构	153
5.2.3	级联型结构	153
5.2.4	并联型结构	154
5.3	有限长单位冲激响应滤波器的基本结构	155
5.3.1	直接型	156
5.3.2	级联型	156
5.3.3	频率采样结构	157
5.3.4	线性相位 FIR 数字滤波器的结构	159
5.4	数字滤波器结构的 MATLAB 实现	160
	习题	165
第 6 章	数字滤波器的设计	167
6.1	数字滤波器的设计指标	167
6.1.1	因果数字滤波器的频率响应	167
6.1.2	数字滤波器的设计指标	171
6.2	FIR 滤波器的窗函数设计方法	174
6.2.1	冲激响应截断法	175
6.2.2	窗函数设计法	178
6.2.3	Kaiser 窗	181

6.3	设计 FIR 滤波器的频率取样方法	184
6.3.1	频率取样方法的基本原理	184
6.3.2	频率取样设计方法对过渡带的优化	187
6.4	设计 FIR 滤波器的最小二乘法	191
6.5	最优等波纹线性相位 FIR 滤波器的设计: Parks-McClellan 算法	195
6.5.1	线性相位 FIR 滤波器振幅响应的统一表示	196
6.5.2	Minimax 误差准则	197
6.5.3	交替定理	200
6.5.4	Parks-McClellan 算法	204
6.6	微分器和 Hilbert 变换器	207
6.6.1	微分器	207
6.6.2	希尔伯特变换器	209
6.7	窗函数法、频率取样法和最小二乘法的 MATLAB 实现	212
6.7.1	按照算法原理编写 m 文件	212
6.7.2	Kaiser 窗滤波器设计方法的 MATLAB 实现	218
6.7.3	设计线性相位 FIR 滤波器的 MATLAB 函数	220
6.8	用 MATLAB 设计最优等波纹线性相位 FIR 滤波器	224
6.9	IIR 数字滤波器的一般设计方法	228
6.9.1	设计 IIR 数字滤波器的两种方案	228
6.9.2	模拟低通滤波器的技术指标	229
6.9.3	平方幅度响应与传输函数的关系	231
6.10	常用的 4 种原型滤波器	233
6.10.1	Butterworth 滤波器	233
6.10.2	Chebyshev I 型滤波器	237
6.10.3	Chebyshev II 型滤波器	241
6.10.4	椭圆滤波器	243
6.11	模拟滤波器到数字滤波器的映射	245
6.11.1	冲激响应不变法	245
6.11.2	双线性变换法	249
6.12	频率变换	252
6.12.1	模拟频率变换	252
6.12.2	数字频率变换	261
6.13	设计 IIR 数字滤波器的 MATLAB	267
6.13.1	一般步骤	267
6.13.2	用于设计 IIR 数字滤波器的主要 MATLAB 函数	271
6.14	MATLAB 中的滤波器设计和分析工具	282
	习题	284

第 7 章 数字信号处理中的有限字长效应	288
7.1 有限字长效应及量化误差	288
7.1.1 有限字长效应	288
7.1.2 二进制数的量化误差	289
7.1.3 A/D 转换器中的量化误差	291
7.2 系数量化对数字滤波器的影响	292
7.2.1 系数量化对滤波器稳定性的影响	292
7.2.2 系数量化对二阶子系统极点位置的影响	293
7.3 数字滤波器的运算量化效应	295
7.3.1 定点运算 IIR 和 FIR 数字滤波器误差分析	295
7.3.2 浮点运算中的有限字长效应	296
7.4 FFT 算法的有限字长效应	297
7.4.1 蝶形运算的统计模型	297
7.4.2 防止溢出和 FFT 输出的信噪比	297
7.5 数字滤波器的有限字长效应的 MATLAB 实现	298
习题	300
第 8 章 数字信号处理的硬件开发	302
8.1 数字信号处理器概述	302
8.1.1 数字信号处理器的发展	302
8.1.2 DSP 系统的典型结构	303
8.1.3 DSP 芯片的特点	303
8.1.4 DSP 芯片的选择	304
8.1.5 DSP 芯片的应用	305
8.2 TMS320 系列器件的结构特点及简介	305
8.2.1 结构特点	305
8.2.2 TMS320C2000 系列简介	307
8.2.3 TMS320C5000 系列	309
8.2.4 TMS320C6000 系列简介	311
8.3 DSP 系统的设计过程	315
8.4 DSP 系统的开发工具	316
8.4.1 开发环境的构成	316
8.4.2 开发工具的组成	316
8.4.3 TI 公司的开发工具	316
参考文献	320

绪 论

数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)是随着信息学科和计算机学科的高速发展而迅速发展起来的一门新兴学科,其重要性日益在各个领域的应用中表现出来。简言之,它是把信号用数字或符号表示的序列,通过计算机或通用(专用)信号处理设备,用数字的数值计算方法处理以达到提取有用信息便于应用的目的。

1. 信号、系统和信号处理

1) 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、声纳、遥控和遥测、计算机、机械震动、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,各种信号无处不有、无时不在。

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,例如位移或距离。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。

如果信号的自变量和函数值都取连续值,则称这种信号为模拟信号或者称为连续时间信号,例如语音信号、电视信号等。如果自变量取离散值,而函数值取连续值,则称这种信号为离散时间信号,这种信号通常来源于对模拟信号的采样。如果信号的自变量和函数值均取离散值,则称为数字信号。数字信号也可以说成信号幅度离散化了的离散时间信号。计算机或者专用数字信号处理芯片的位数是有限的,用它们分析与处理信号,信号的函数值必须用有限位的二进制编码表示,这样信号本身的取值不再是连续的,而是离散值。这种用有限位二进制编码表示的离散时间信号就是数字信号,因此,数字信号是幅度量化了的离散时间信号。

图 I 示出的是连续时间信号和离散时间信号的例子。其中,图 I (a)是时间和振幅都连续的模拟信号,图 I (b)是时间离散而振幅连续的取样信号,图 I (c)中的黑点是时间和振幅都离散的数字信号,图 I (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 I (a)和图 I (d)属于连续时间信号,图 I (b)和图 I (c)属于离散时间信号。

2) 系统

这里的系统是处理(或变换)信号的物理设备,或者进一步说,凡是能将信号加以变换以达到人们要求的各种设备都称为系统。系统有大小之分,一个大系统中又可细分为若干个小系统。实际上,因为系统是完成某种运算(操作)的,因而还可把软件编程也看成一种系统的实现方法。

信号有模拟信号、离散时间信号和数字信号之分,按照系统的输入输出是哪一类信号,系统也有模拟系统、离散时间系统和数字系统之分。

(1) 模拟系统: 处理模拟信号,系统输入、输出均为连续时间连续幅度的模拟信号。

(2) 连续时间系统: 处理连续时间信号,系统输入、输出均为连续时间信号。

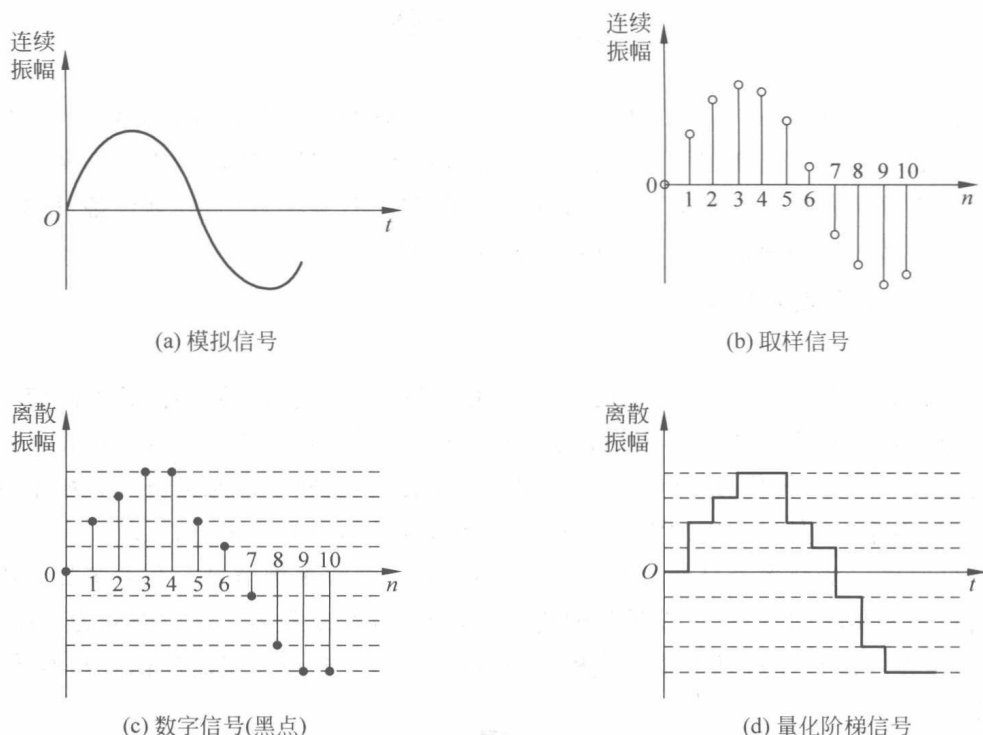


图 I 连续时间信号和离散时间信号示例

(3) 离散时间系统：处理离散时间信号——序列、系统输入、输出均为离散时间信号。

(4) 数字系统：处理数字信号，系统输入、输出均为数字信号。

此外，还存在模拟网络和数字网络构成的混合系统。

系统可分为线性的或非线性的、时(移)不变或时(移)变的。

3) 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(例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，数字信号处理的目的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。

2. 数字信号处理系统的基本组成

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 II 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。

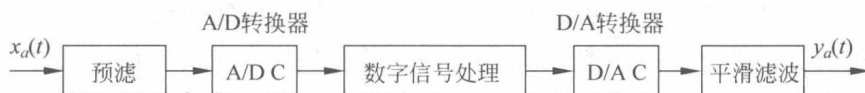


图 II 对模拟信号进行数字处理的原理方框图

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);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。

从 A/D C(Analog/Digital Converter)输出的数字信号输入数字信号处理器后变成输出数字信号,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,就把它转换成为输出信号 $y_d(t)$,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,滤去阶梯信号的高频跳变,得到平滑的输出模拟信号 $y_a(t)$ 。

如图 II 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,这种情况下就无须 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,处理后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 转换器和后置的平滑滤波器了。

3. 数字信号处理的优缺点

1) 优点

相对于模拟信号处理,数字信号处理具有以下主要优点。

(1) 高可靠性、高精度度和高稳定性

在传输和处理过程中,数字信号用二进制数 0 和 1 的码字序列表示,而 0 和 1 又是用脉冲的有无或脉冲的正负表示的,即使在有噪声或干扰存在的情况下,只要能够判别出脉冲的有无或正负,就能够准确传输和处理 0 和 1 表示的数字序列,因此,这种表示几乎不受噪声和干扰的影响。此外,采用检错和纠错技术,在信息码中附加较多的检错码和纠错码,还能够进一步提高数字信号的可靠性。与此相反,模拟信号的波形受噪声和干扰的影响很大,而且不可能采用检错和纠错技术,因此,它的传输和处理不可能达到数字信号那样的高可靠性。正因为如此,在任何存储介质(磁带、磁盘或光盘)中储存的数字信号,经过很长时间后仍然能够几乎无失真地恢复,而储存的模拟信号却会由于时间久远受到污损无法恢复。

例如,从卫星上向地球传送一幅照片,虽然发送机的发射功率可以达到 10W,但是地球上的接收机接收到的信号功率却只有 W 数量级,如果用模拟信号进行传送和处理,那么,

接收信号将严重地被噪声“污染”，根本无法恢复原始照片。但是，利用数字信号进行传输和处理，恢复的照片却具有非常高的清晰度。

模拟信号处理的精度常常受到模拟系统精度的限制，因为实际系统中的模拟元器件的参数值不可能完全按照设计要求来实现，往往达不到设计的精度要求。因此，实际中要建立一个精确的模拟信号处理系统一般是很困难的。在数字信号处理系统中不存在这个困难，因为用二进制码表示数字信号的精度完全由码字长度决定。在实现数字信号处理系统时，只要取样率足够高并用足够多的位数来表示取样值，就能够达到所要求的任何高的精度。

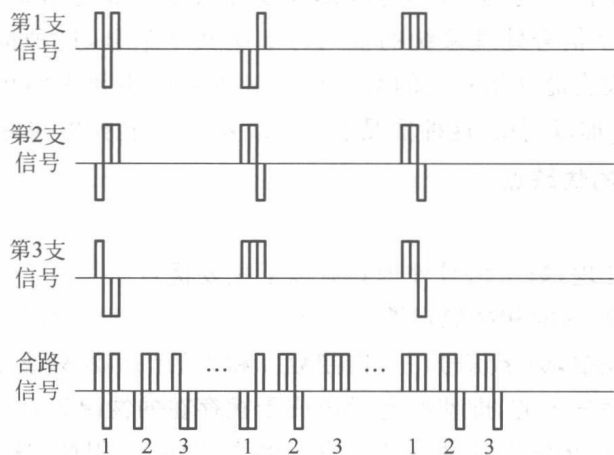
数字信号处理器主要由数字器件组成，采用大规模或超大规模集成电路技术，器件参数和性能受温度等环境因素影响很小，而且在制造和使用过程中一般都不需要调整，因此性能非常稳定。

(2) 时分复用

在数字信号相邻取样值之间，存在着比较长的空闲期间。在这个期间内，可以利用同一个数字信号处理设备来处理其他通道的信号，这就是所谓的“时分复用”过程。

图Ⅲ是说明将多路支路信号合并成一路合路信号的原理示意图。图中，各支路信号和合路信号的波形是用正负脉冲表示的数字信号的二进制码，合路信号中各组脉冲下面的数字是支路的编号。

时分复用是数字信号处理的最大优点之一。利用时分复用，就可以用一套数字设备“时分”处理多个通道的信号，这对于数字信号处理的工程实现是经济的。例如，电话质量的语音信号的频带宽度通常是 3.4kHz，典型的取样频率为 8kHz，量化字长为 8b，因此数字化后的码率为 64kb/s。假设数字处理设备至少每秒能够处理 1544kb 的信号，那么用一套处理设备和一根电话线就可以处理和传送 24 路语音信号。



图Ⅲ 时分复用原理

(3) 灵活、方便，易于集成

在数字信号处理中，无论声音信号、图像信号和视频信号，还是其他任何信号，都统一由二进制数 0 和 1 表示成数字序列，数字序列可以很方便地进行保存、复制、剪裁、融合、加密、传输和处理。数字信号处理归结为对数字序列进行一系列运算，这些运算构成了各种数字信号处理算法。将数字信号处理算法编写成程序，可以在计算机上运行，从而完成各种不同

的数字信号处理功能。因此,只需要改变程序就能够改变功能,通过调整程序中设置的参数来调整技术指标。这种灵活性为自适应信号处理,为具有可编程特性的系统(如截止频率可调的滤波器)的实现提供了很大的方便。和计算机的其他任何应用程序一样,数字信号处理算法程序也可以很方便地进行调试、修改、保存、复制、传送和移植。

无论多么复杂的数字信号处理算法,都是由序列的一些最基本运算组成的。这些运算不仅可以利用计算机来完成,也可以用数字信号处理器(习惯上称为 DSP 芯片)或其他专用芯片(ASIC 芯片)与软件相配合来完成。DSP 芯片和其他 ASIC 芯片,一般都采用大规模或超大规模集成电路技术制造,因此具有体积小、重量轻、性能品质稳定和可靠性高等优点。

(4) 其他的独特优点

数字信号处理还具有模拟信号处理完全不可能有的其他一些独特的优点。例如,利用有限冲激响应数字滤波器可以获得严格的线性相位;利用数字滤波器组可以实现多速率信号处理;数字系统的级联不需要考虑负载匹配问题;能够处理如地震信号那样非常低频率的信号,如果采用模拟信号处理,模拟元件的尺寸将大到无法容忍的地步。

2) 缺点

数字信号处理的主要缺点如下。

(1) 系统复杂程度增加,不经济

对模拟信号进行数字处理,需要如图 II 所示的那样首先用 A/D 转换器将模拟信号数字化,在数字处理过程完结后又需要用 D/A 转换器还原成模拟信号,同时需要有反混叠失真滤波器和平滑滤波器相配合;如果只是为了处理单个模拟信号,显然数字处理方法增加了系统的复杂程度,是不经济的。

(2) 处理速度受到限制

处理速度受到限制,特别是在处理频率很高的信号时,这种限制将成为一个主要缺点。

一方面要受到 A/D 和 D/A 转换速度和精度的限制,另一方面要受到数字信号处理算法本身的计算速度的限制。A/D 转换的速度和精度有相互制约关系,即提高速度必然降低精度。例如,在目前的技术水平和工艺条件下,A/D 转换的取样频率虽然很高可以达到 1GHz,但是精度(或分辨率)却只有 6b,不能满足大多数应用的需要。为了达到 12~16b 的精度要求,就只能把取样率限制在 10MHz 以下。为了提高数字信号处理的适用频率范围,一方面需要研制具有更高速度和精度的 A/D 和 D/A 转换技术,另一方面需要研究数字信号处理的快速算法。

(3) 硬件系统功率消耗很大

在用硬件实现数字信号处理时,需要采用 DSP 芯片或其他专用的 ASIC 芯片,这些大规模或超大规模集成电路芯片上集成了几十万甚至上百万个晶体管,功率消耗超过 1W。而模拟信号处理系统中大量使用的是无源器件,功耗一般小得多。此外,许多大功率模拟信号(例如,大功率发射机中的某些信号),数字信号处理也无法取代模拟信号处理。

4. 数字信号处理的应用

数字信号处理技术的应用领域非常广泛,这里对以下主要几点作概略介绍。

1) 语音和音频信号处理

这是最早采用数字信号处理技术,并推动数字信号处理学科发展的应用领域之一,主要包括:第一,语音分析。对语音和音频信号的波形特征、统计特性、功率谱、模型参数、听觉

感知特性等的分析、处理和计算。第二,语音编码。将语音和音频信号数字化,在保证语音质量的前提下用尽可能少的二进制码表示数字语音,达到压缩信息的目的。现已发展波形编码、参数编码和混合编码三大编码方法,制定了一系列国际和地区的语音编码标准。第三,语音识别。用计算机软件或专用硬件,识别自然语音(人类说出的话音),或识别说话人。第四,语音合成。用硬件或在计算机上运行程序,来产生人类能够听懂或理解的语音。第五,语音增强。从噪声或干扰中提取被掩盖的语音信号。

2) 数字图像处理

这里的图像包括静止图像和活动图像(视频)、二维图像和三维图像、黑白图像和彩色图像,涉及图像信息的获取、存储、传送、显示和利用。具体包括数字图像的算术处理、几何处理、图像编码、图像传送、图像增强、图像重建、图像识别和图像理解等内容。其中,图像编码在图像传送和图像存储应用中起着最关键的作用,因而受到格外的重视。近年来,制订了JPEG、MPEG-1、MPEG-2、MPEG-4、MPEG-7、H. 261、H. 263、H. 264 等一系列关于图像编码的国际和地区的标准推动了相关应用领域的迅速发展。

3) 通信

在现代通信系统中,几乎没有一部分不受到数字信号处理技术的深刻影响。特别是在无线移动通信系统中,从信源编码、信道编码、调制、多路复用到信道估计、自适应信道均衡、多用户检测,都需要采用数字信号处理技术。在图像通信、网络通信、多媒体通信等最新应用领域中,数字信号处理技术正在发展着重要作用。被认为是发展方向的软件无线电技术,如果离开了数字信号处理也将寸步难行。

4) 广播和电视

随着数字音频广播、数字电视、高清晰度电视的推广和普及,与之配套的数字收音机、大容量高清晰度存储器件和设备,也逐渐形成具有很高产值的市场。数字信号处理技术的应用,也为音乐产品的制作开辟了崭新的局面。在音乐的编辑、合成、加入交混回响、生成合音效果,以及作曲、录音、播放、旧唱片和旧录音带的音质恢复等方面,数字信号处理技术都显示了特殊的作用。

5) 雷达和声纳

由于雷达信号具有非常宽的频带和非常高的数据速率,因此,压缩数据量和降低数据传输速率,成为了雷达信号数字信号处理面临的首要问题。此外,微弱信号检测、高分辨率谱估计、阵列信号处理、以及目标识别和跟踪等技术,也是雷达信号处理的重要任务。

声纳系统分为有源和无源系统两类。有源声纳系统信号处理涉及的理论和技术,在许多方面都与雷达信号处理相同。例如,探测信号的产生、加工处理和发射,微弱的目标回波信号的检测接收和分析,对目标的探测、定位、跟踪、导航、成像显示等,都需要用到数字信号处理中的滤波、门限比较、谱估计等技术。无源声纳系统与有源声纳系统不同,它不主动发射信号,而只是被动地接收目标的辐射,即“倾听”周围的声音,因此,它所采用的主要是微弱信号检测、高分辨率谱估计和阵列信号处理等技术。

6) 地球物理

这是应用数字信号处理技术已有相当长历史的一个领域,该领域信号处理的主要任务是分析人造地震信号,建立描述地层内部结构和性质的模型,并将模型用于矿藏和石油的勘探。另一任务是用信号处理方法研究地震和火山的活动规律。近年来,还将数字信号处理

技术用于大气层性质的研究,分析大气层中电子的含量,检测空气中悬浮离子的分布和密度,这些都是环境保护的重要工作。

7) 生物医学

数字信号处理在医学中的应用日益普遍,例如,脑电图和心电图的检测和分析、层析 X 射线摄影的分析、胎儿心音的自适应检测等。

8) 消费电子

这是一个发展迅速和消费市场广泛的应用领域。该领域涉及音频、视频、图像、音乐、玩具、游戏、娱乐等电子产品,无论是硬件或软件产品,都需要应用数字信号处理技术。

9) 军事

除了上面提到的语音和音频、图像和视频、通信、雷达、声纳等技术可以直接应用于军事领域外,导航、制导、电子对抗、战场侦察、保密通信、卫星遥感、红外成像等技术,都是现代军事的重要科学技术,这些技术都与数字信号处理学科有非常密切的关系。

10) 其他应用

除了上述应用领域外,还有许多领域都可以用数字信号处理技术来促进它们的发展。因此,要完全列举数字信号处理技术的所有应用领域几乎是不可能的。例如,在电力系统中,可以用数字信号处理技术规划能源分配和调度,对能源分布进行自动监测;在环境保护中,用数字信号处理技术对空气污染和噪声干扰进行自动监测;在经济领域中,对股票市场进行动态预测,对国家和地区的经济活动进行效益分析等。

第1章 离散时间信号和离散时间系统

1.1 引言

离散时间信号和离散时间系统的理论和分析方法,是数字信号处理的基础。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。

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”这两个名词可以相互通用,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,只有当 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),因而是有限精确的。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,也就是说,信号的自变量和函数值均取离散值,则称为数字信号。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 $x(n)$ 表示未被量化的序列,而用 $\hat{x}(n)$ 表示量化了的序列。

本章内容主要学习离散时间信号的表示方法和典型信号、线性时不变系统的因果性和稳定性,以及系统的输入输出描述法,线性常系数差分方程的解法。最后介绍模拟信号的数字处理方法。

1.2 离散时间信号——序列

对模拟信号 $x_a(t)$ 进行等间隔采样,采样间隔为 T ,得到

$$x_a(t) \big|_{t=nT} = x_a(nT), \quad -\infty < n < \infty \quad (1.2.1)$$

这里 n 取整数。对于不同的 n 值, $x_a(nT)$ 是一个有序的数字序列: $\cdots, x_a(-T), x_a(0),$