



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
国家级精品课程、国家级精品共享课程教材

数字信号处理 原理与实现 (第3版)

刘 泉 郭志强 主编

精心制作 **48** 个教学视频与 **15** 个动画

扫码即可观看



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>



欢迎登录 **免费** 获取优质教学资源
<http://www.hxedu.com.cn>

数字信号处理原理与实现

(第3版)

本书是在普通高等教育“十一五”国家级规划教材《数字信号处理原理与实现》第2版的基础上修订而成的。根据普通高校本科生教学大纲要求选材,本次修订在系统地讨论了数字信号处理的基本原理、基本概念与基本分析方法的基础上,跟踪学科发展的前沿,增加了数字信号处理的工程应用,具体包括五个实际工程应用案例。全书共10章,包括绪论、时域离散时间信号与系统、离散信号与系统的频域分析、离散傅里叶变换(DFT)、快速傅里叶变换(FFT)、数字滤波器的基本网络结构、无限长冲激响应滤波器的设计方法、有限长冲激响应滤波器的设计方法、多采样率数字信号处理、数字信号处理的工程应用。

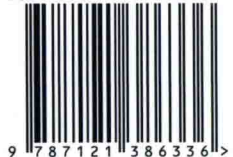
为便于教师的教学及学生对采样概念的深入理解,这次修订充分利用了数字化、立体化教材的编撰方法,在以文字介绍为主的基础上,为重点和难点部分配备了视频讲解和动画演示。

本书可作为普通高等学校电子信息类专业和相近专业本科生、工程硕士研究生的教材,也可作为非电子信息类专业硕士研究生的教材,还可作为科技人员的参考书。



责任编辑:谭海平
封面设计:徐海燕

ISBN 978-7-121-38633-6



定价: 55.00元



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
国家级精品课程、国家级精品共享课程教材

数字信号处理原理与实现

(第3版)

刘 泉 郭志强 主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书是在普通高等教育“十一五”国家级规划教材《数字信号处理原理与实现》第2版的基础上修订而成的。根据普通高校本科生教学大纲要求选材,本次修订在系统地讨论了数字信号处理的基本原理、基本概念与基本分析方法的基础上,跟踪学科发展的前沿,增加了数字信号处理的工程应用,具体包括五个实际工程应用案例。全书共10章,包括绪论、时域离散时间信号与系统、离散信号与系统的频域分析、离散傅里叶变换(DFT)、快速傅里叶变换(FFT)、数字滤波器的基本网络结构、无限长冲激响应滤波器的设计方法、有限长冲激响应滤波器的设计方法、多采样率数字信号处理、数字信号处理的工程应用。

为便于教师的教学及学生对概念的深入理解,这次修订充分利用了数字化、立体化教材的编撰方法,在以文字介绍为主的基础上,为重点和难点部分配备了视频讲解和动画演示。

本书可作为普通高等学校电子信息类专业和相近专业本科生、工程硕士研究生的教材,也可作为非电子信息类专业硕士研究生的教材,还可作为科技人员的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理原理与实现/刘泉,郭志强主编. —3版. —北京:电子工业出版社,2020.7

ISBN 978-7-121-38633-6

I. ①数… II. ①刘… ②郭… 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(2020)第036266号

责任编辑:谭海平

特约编辑:王 崧

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:18 字数:483千字

版 次:2005年8月第1版

2020年7月第3版

印 次:2020年7月第1次印刷

定 价:55.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010)88254552, tan02@phei.com.cn。

前 言

本书第2版出版至今已有十年。在这十年里,随着大数据、云计算、人工智能等新技术的出现,信息学科得到空前发展。对信号的处理和分析,已经成为多学科和多领域专家、学者及技术人员共同关心的理论与技术问题。

2005年,我们在研究国内外同类教材并结合多年教学经验的基础上,编写、出版了《数字信号处理原理与实现》,被很多高校和科研院所作为教材或参考书,并于2008年获批国家“十一五”规划教材,也为本课程获批国家级精品课程、国家级精品资源共享课程奠定了基础。之后,根据读者的反馈,我们对教材进行修订,增加了使用MATLAB解决数字信号处理问题的实例,并于2009年出版了《数字信号处理原理与实现(第2版)》。又经过十年的教学实践,以及众多热心读者的反馈,特别是为进一步体现现代教学的需求,适应数字信号处理理论与应用的最新发展,我们重新组建了教材改编小组,从内容到形式对原有教材进行了更进一步的修订。

全书共10章。第1章介绍数字信号处理学科发展概况、系统框架及应用领域;第2~3章叙述离散时间信号与系统的时域分析方法和频域分析方法,这两章是学习和应用数字信号处理的重要基础;第4~5章叙述离散傅里叶变换(DFT)和快速傅里叶变换(FFT)的理论基础与应用;第6~8章重点讨论数字滤波的基本概念、结构和设计方法,其中第6章介绍无限长冲激响应(IIR)滤波器、有限长冲激响应(FIR)滤波器和几种特殊数字滤波器的网络结构;第7章叙述模拟滤波器和IIR数字滤波器的设计方法;第8章介绍FIR数字滤波器的具体设计方法;第9章介绍多采样率数字信号处理;第10章简要介绍数字信号处理的工程应用,包括地震波去噪、信道均衡、数字变声器、脑电信号和肌电信号处理等。

重新修订的教材整体结构循序渐进,内容深入浅出,以信号分析为基础,以处理技术为手段,跟踪信号处理领域的最新发展,体现了原理、方法和技术应用的有机结合。例如,第5章增加了基4-FFT算法、分裂基FFT算法和线性调频Z变换算法,第6章增加了全零点和全极点格型网络结构,第10章以工程案例的形式说明了数字信号处理的应用。此外,对部分例题也进行了补充和改编,使其更加契合理论学习。

本书在形式上充分利用了现代教材建设手段,引进了数字化、立体化编撰方法,针对教材的知识难点与重点在不同章节中精心制作了48个教学视频与15个动画,并且以精炼的内容讲解了某些知识点,进一步增强了教材的可读性和可用性。

本书主要由刘泉老师和郭志强老师负责修订,郑林老师、许建霞老师、桂林老师和曹辉老师参与了修订,马靓云、刘希康、邹翔宇、刘昕等参加了部分程序的调试和插图编绘工作,阙大顺老师审阅了全书。本书的出版得到了电子工业出版社谭海平老师的大力支持,在此深表感谢!同时我们要特别感谢参加本书第1版和第2版编写与出版工作的所有老师!

受编者水平所限,教材中难免有错误或不足之处,敬请广大同行和读者批评指正。

编 者

2019年10月30日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 数字信号处理的定义和特点	1
1.1.1 数字信号处理的定义	1
1.1.2 数字信号处理的特点	1
1.2 数字信号处理系统的基本组成与实现方法	2
1.2.1 数字信号处理系统的基本组成	2
1.2.2 数字信号处理的实现方法	2
1.3 数字信号处理的应用领域	3
1.4 数字信号处理的发展趋势	4
第 2 章 时域离散时间信号与系统	5
2.1 连续时间信号的采样	5
2.1.1 信号的采样	5
2.1.2 采样定理	6
2.1.3 信号的恢复	7
2.2 离散时间信号序列	9
2.2.1 序列及其表示	9
2.2.2 常用的典型序列	9
2.2.3 序列的运算	12
2.2.4 用单位采样序列表示任意序列	17
2.3 线性非移变系统	17
2.3.1 线性系统	18
2.3.2 非移变系统	18
2.3.3 单位采样响应与卷积和	18
2.3.4 线性非移变系统的性质	19
2.3.5 稳定系统	20
2.3.6 因果系统	20
2.4 线性常系数差分方程	21
2.4.1 线性常系数差分方程	21
2.4.2 线性常系数差分方程的求解	22
2.4.3 用差分方程表示滤波器系统	22
2.5 离散时间信号与系统时域分析综合举例及 MATLAB 实现	23
习题	29
第 3 章 离散时间信号与系统的频域分析	32
3.1 序列的傅里叶变换	32

3.1.1	序列的傅里叶变换的定义	32
3.1.2	傅里叶变换的性质	33
3.2	序列的 Z 变换	38
3.2.1	Z 变换的定义及收敛域	39
3.2.2	几种序列的 Z 变换及其收敛域	39
3.3	Z 反变换	44
3.3.1	留数法	44
3.3.2	部分分式展开法	46
3.3.3	幂级数法(长除法)	47
3.4	Z 变换的基本性质和定理	48
3.4.1	线性	48
3.4.2	序列的移位	48
3.4.3	乘以指数序列(Z 域尺度变换)	48
3.4.4	序列的线性加权	49
3.4.5	序列的共轭序列	49
3.4.6	序列的反褶	49
3.4.7	初值定理	49
3.4.8	终值定理	49
3.4.9	卷积定理	50
3.4.10	复卷积定理	51
3.4.11	帕塞瓦尔定理	51
3.5	Z 变换、傅里叶变换、拉普拉斯变换的关系	52
3.5.1	$x(n)$ 的 Z 变换与序列的傅里叶变换之间的关系	52
3.5.2	$x(n)$ 的 Z 变换与 $\hat{x}_a(r)$ 的拉普拉斯变换之间的关系	53
3.5.3	序列的 Z 变换与模拟信号的傅里叶变换之间的关系	54
3.6	离散时间系统的系统函数与系统频率响应	55
3.6.1	系统函数	55
3.6.2	利用系统函数的极点分布确定系统的因果性与稳定性	55
3.6.3	系统频率响应函数	56
3.6.4	系统频率响应的几何确定法	57
3.6.5	最小相位系统及全通系统	60
3.7	离散时间信号与系统频域分析综合举例及 MATLAB 实现	60
	习题	64
第4章	离散傅里叶变换	67
4.1	傅里叶变换的几种形式	67
4.1.1	连续非周期时间信号的傅里叶变换	67
4.1.2	连续周期时间信号的傅里叶变换	68
4.1.3	离散非周期时间信号的傅里叶变换	68
4.1.4	离散周期信号的傅里叶变换	69
4.2	离散傅里叶级数(DFS)	69

4.2.1 离散傅里叶级数的导出	69
4.2.2 离散傅里叶级数的性质	71
4.3 离散傅里叶变换 (DFT)	73
4.3.1 离散傅里叶变换 (DFT) 的导出	73
4.3.2 离散傅里叶变换的物理意义及隐含的周期性	75
4.4 离散傅里叶变换的基本性质	76
4.4.1 线性	77
4.4.2 序列的圆周移位定理	77
4.4.3 延长序列的离散傅里叶变换	78
4.4.4 复共轭序列的 DFT	78
4.4.5 DFT 的对称性	78
4.4.6 圆周卷积	81
4.4.7 帕塞瓦尔定理	84
4.4.8 圆周相关定理	84
4.5 频率采样定理	86
4.6 离散傅里叶变换综合举例与 MATLAB 实现	88
习题	91
第 5 章 快速傅里叶变换	93
5.1 直接计算 DFT 的问题及改进的基本途径	93
5.1.1 直接计算 DFT 的运算量	93
5.1.2 改进措施	93
5.2 按时间抽取的基 2 FFT 算法 (DIT-FFT)	94
5.2.1 算法原理	94
5.2.2 DIT-FFT 的运算量	98
5.2.3 DIT-FFT 算法的特点	99
5.3 按频率抽取的基 2 FFT 算法 (DIF-FFT)	101
5.3.1 算法原理	101
5.3.2 DIF-FFT 的运算量	103
5.3.3 按频率抽取的 FFT 的特点	104
5.3.4 DIT-FFT 与 DIF-FFT 的区别与联系	104
5.4 离散傅里叶反变换的快速算法 (IFFT)	105
5.5 N 为复合数的 FFT 算法	106
5.5.1 整数的多基多进制表示	106
5.5.2 N 为复合数的快速离散傅里叶变换	107
5.6 基 4 FFT 算法	108
5.6.1 算法原理	108
5.6.2 运算步骤和结构流程图	110
5.6.3 运算量	112
5.7 分裂基 FFT 算法	112
5.7.1 运算原理和结构流程图	112

5.7.2 运算量	114
5.8 线性调频 Z 变换算法	115
5.8.1 算法的基本原理	115
5.8.2 线性调频 Z 变换的实现步骤	117
5.8.3 运算量的估算	118
5.9 实序列的 FFT 算法	119
5.9.1 用 N 点 FFT 计算两个 N 点实序列的 DFT	119
5.9.2 用 N 点 FFT 计算一个 $2N$ 点实序列的 DFT	120
5.10 快速傅里叶变换的编程思想及实现	120
5.10.1 FFT 算法的编程思想	120
5.10.2 DIT-FFT 实现的 C 语言代码	121
5.11 快速傅里叶变换的应用	122
5.11.1 快速卷积运算	122
5.11.2 使用 DFT 对连续时间信号进行谱分析	126
5.12 快速傅里叶变换综合举例与 MATLAB 实现	128
习题	135
第 6 章 数字滤波器的基本网络结构	137
6.1 数字滤波器结构的表示方法	137
6.2 无限长冲激响应滤波器的基本网络结构	138
6.2.1 直接 I 型	139
6.2.2 直接 II 型	139
6.2.3 级联型	140
6.2.4 并联型	141
6.2.5 转置定理	142
6.3 有限长冲激响应 (FIR) 滤波器的基本网络结构	143
6.3.1 直接型	143
6.3.2 级联型	143
6.3.3 快速卷积型	144
6.3.4 线性相位 FIR 滤波器的结构	144
6.3.5 频率采样型结构	146
6.4 数字滤波器的格型结构	149
6.4.1 全零点系统 (FIR 系统) 的格型结构	149
6.4.2 全极点系统 (IIR 系统) 的格型结构	151
6.4.3 零-极点系统 (IIR 系统) 的格型结构	153
6.5 数字信号处理中的有限字长效应	155
6.5.1 量化误差	155
6.5.2 量化误差的统计方法	155
6.5.3 乘积的舍入误差	157
6.6 数字滤波器网络结构综合举例与 MATLAB 实现	159
习题	165

第 7 章 无限长冲激响应滤波器的设计方法	167
7.1 一般数字滤波器的设计方法概述	167
7.1.1 数字滤波器的分类	167
7.1.2 数字滤波器的技术要求	168
7.1.3 数字滤波器的设计方法概述	169
7.2 模拟滤波器的设计方法简介	170
7.2.1 由幅度平方函数确定系统函数	170
7.2.2 巴特沃斯滤波器	171
7.2.3 切比雪夫滤波器	173
7.3 用冲激响应不变法设计 IIR 数字低通滤波器	178
7.3.1 变换原理	178
7.3.2 混叠失真	179
7.3.3 模拟滤波器的数字化方法	180
7.3.4 优缺点分析	181
7.4 用双线性变换法设计 IIR 数字低通滤波器	181
7.4.1 变换原理	181
7.4.2 变换常数的选择	182
7.4.3 逼近情况分析	183
7.4.4 优缺点分析	183
7.4.5 滤波器的数字化方法	184
7.5 IIR 数字滤波器的模拟频率变换设计方法	185
7.5.1 模拟滤波器变换成数字带通滤波器	185
7.5.2 模拟低通滤波器变换成数字带阻滤波器	188
7.5.3 模拟低通滤波器变换成数字高通滤波器	190
7.6 IIR 数字滤波器的数字频率变换设计方法	192
7.7 IIR 数字滤波器设计综合举例与 MATLAB 实现	194
习题	199
第 8 章 有限长冲激响应滤波器的设计方法	202
8.1 线性相位 FIR 滤波器的特点	202
8.1.1 线性相位条件	202
8.1.2 线性相位 FIR 滤波器的频率响应特点	204
8.1.3 幅度函数的特点	206
8.1.4 零点位置	209
8.2 利用窗函数法设计 FIR 滤波器	210
8.2.1 设计原理	210
8.2.2 加窗处理产生的影响	212
8.2.3 各种窗函数	214
8.2.4 窗函数法的设计步骤	218
8.2.5 窗函数法计算中的主要问题	219
8.3 利用频率采样法设计 FIR 滤波器	220

8.3.1 设计原理	220
8.3.2 用频率采样法设计线性相位滤波器的条件	220
8.3.3 逼近误差及其改进措施	221
8.4 IIR 与 FIR 数字滤波器的比较	222
8.5 FIR 数字滤波器设计综合举例与 MATLAB 实现	223
习题	232
第9章 多采样率数字信号处理	234
9.1 信号的整数倍抽取	234
9.1.1 信号整数倍抽取的时域描述	234
9.1.2 信号整数倍抽取的频域解释	235
9.1.3 抗混叠滤波器	236
9.2 信号的整数倍插值	237
9.2.1 信号整数倍内插的时域描述	237
9.2.2 信号整数倍内插的频域解释	239
9.3 按有理因子 I/D 的采样率转换	240
9.4 采样频率转换滤波器的实现	241
9.4.1 直接型 FIR 滤波器结构	241
9.4.2 多相滤波器的 FIR 结构	244
9.4.3 变换采样率的多级实现	245
9.5 多采样率数字信号处理综合举例与 MATLAB 实现	247
习题	250
第10章 数字信号处理的工程应用	252
10.1 设计巴特沃斯滤波器去除噪声对地震波的干扰	252
10.1.1 MATLAB 的主要函数介绍	252
10.1.2 地震波信号处理	253
10.1.3 代码	254
10.2 自适应滤波器用于信道均衡	256
10.2.1 基本原理	256
10.2.2 系统仿真	256
10.3 数字变声器	259
10.3.1 变声原理	259
10.3.2 实现方法	259
10.4 面向脑机接口的运动意图识别	263
10.4.1 运动意图识别原理	263
10.4.2 实现方法	264
10.5 肌电控制人机交互的运动意图识别	267
10.5.1 目的及原理	267
10.5.2 实现方法	268
汉英名词对照表	272
参考文献	277

第 1 章 绪 论

随着信息科学和计算机技术的日新月异，数字信号处理（Digital Signal Processing, DSP）的理论和应用得到了飞跃式发展。信息科学和技术研究的核心内容主要是信息的获取、传输、处理、识别和综合利用等。作为研究数字信号与系统基本理论和方法的数字信号处理，已经形成一门独立的学科体系。数字信号处理是一门应用性很强的学科，随着超大规模集成电路的发展及计算机技术的进步，数字信号处理理论与技术日趋成熟，并且仍在不断发展中。数字信号处理技术在越来越广泛的科技领域中得到应用，其重要性也在不断提高。

1.1 数字信号处理的定义和特点

1.1.1 数字信号处理的定义

数字信号是用数字序列表示的信号；数字信号处理是指通过计算机或专用处理设备，用数值计算等方式对数字序列进行各种处理，将信号变换成符合需要的某种形式的过程。数字信号处理主要包括数字滤波和数字频谱分析两大部分。例如，对数字信号进行滤波，限制其频带或滤除噪声和干扰，以提取和增强信号的有用分量；对信号进行频谱分析或功率谱分析，了解信号的频谱组成，以对信号进行识别。当然，用数字方式对信号进行滤波、变换、增强、压缩、估计和识别等处理，都是数字信号处理的研究范畴。

数字信号处理在理论上所涉及的范围非常广泛。数学领域中的微积分、概率统计、随机过程、高等代数、数值分析、复变函数和各种变换（如傅里叶变换、Z 变换、离散傅里叶变换、小波变换等）都是它的基本工具，网络理论、信号与系统等则是它的理论基础。在学科发展上，数字信号处理又和最优控制、通信理论等紧密相关，目前已成为人工智能、模式识别、神经网络等新兴学科的重要理论基础，其实现技术又和计算机科学和微电子技术密不可分。特别是与深度学习等机器学习理论结合后，提升了信号处理的能力和手段，扩展了信号处理的应用范围。因此，数字信号处理既把经典的理论体系作为自身的理论基础，又使自己成为一系列新兴学科的理论基础。

1.1.2 数字信号处理的特点

与模拟信号处理相比，数字信号处理具有以下优点。

(1) **高精度**。17 位字长的数字信号处理系统，其精度可达 10^{-6} 。在计算机和微处理器普遍采用 16 位、32 位存储器的情形下，配合适当的编程或采用浮点算法，可以达到相当高的精度。

(2) **高稳定性**。数字信号处理系统的特性不易随使用条件的变化而变化，在使用了超大规模集成的数字信号处理芯片（DSP 芯片）的情况下，提高了系统的稳定性；数字信号本身只有两种状态，其抗干扰能力优于模拟信号，具有很高的可靠性。

(3) **灵活性好**。数字信号处理系统的性能取决于系统参数，而这些参数存放在存储器中，改变存放的参数，就可改变系统的性能，得到不同的系统；数字信号处理系统的灵活性还表现在可

以利用一套计算设备同时处理多路相互独立的信号,即所谓的“时分复用”。

(4) 易于大规模集成。数字部件由逻辑元件和记忆元件构成,具有高度的规范性,易于大规模集成化和大规模生产,这也是 DSP 芯片迅速发展原因之一。

此外,采用数字信号处理系统还可以方便地完成信息安全中的数字加密,并且能够实现模拟系统无法完成的许多复杂的处理功能,如信号的任意存取、严格的线性相位特性、解卷积和多维滤波等。

数字信号处理系统对数字信号进行存储和运算,可以获得许多高的性能指标,对于低频信号尤其优越。目前数字信号处理系统的速度还不能达到处理高频信号(如射频信号)的要求。然而,随着大规模集成电路、高速数字计算机的发展,尤其是微处理器的发展,数字信号处理系统的速度将会越来越高,数字信号处理也会越来越显示出其优越性。

1.2 数字信号处理系统的基本组成与实现方法

1.2.1 数字信号处理系统的基本组成

数字信号处理系统是应用数字信号处理方法来处理模拟信号的系统,其基本组成如图 1.1 所示。

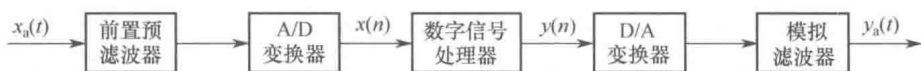


图 1.1 数字信号处理系统的基本组成

为了用数字的方法处理模拟信号,首先必须数字化模拟信号 $x_a(t)$,即模拟信号首先通过一个连续时间的前置预滤波器,使输入模拟信号的最高频率限制在一定范围内,然后在 A/D 变换器中进行采样、量化和编码处理,将模拟信号变成时间上和幅值上都量化离散的信号,即数字信号 $x(n)$ 。

数字信号处理器承担数字信号的各种处理工作,它既可以是一台通用计算机,又可以由各种硬件或软/硬件构成的专用处理器,还可以是某个处理软件或软件包。数字信号按一定要求在数字信号处理器中进行加工,获得符合要求的数字信号 $y(n)$ 。

最后, $y(n)$ 通过 D/A 变换器将数字信号变成模拟信号,并由一个模拟滤波器滤除不必要的高频分量,输出所需的模拟信号 $y_a(t)$ 。

实际的数字信号处理系统不一定要包括图 1.1 中的所有部分。例如,对于纯数字系统,就只需要数字信号处理器这一核心部分。

1.2.2 数字信号处理的实现方法

数字信号处理的主要研究对象是数字信号,并采用数值运算的方法达到处理的目的。数字信号处理的实现方法基本上可以分为软件实现方法、硬件实现方法和软/硬件相结合的实现方法。数字信号处理的理论、算法和实现方法三者是密不可分的。

数字信号处理的软件实现方法是按照原理和算法,自行编写程序或采用现有程序在通用计算机上实现的一种方法;硬件实现方法是按照具体的要求和算法,设计硬件结构图,用乘法器、加法器、延时器、存储器、控制器及输入/输出接口部件实现的一种方法。显然,软件实现方法灵活,通过修改程序中的有关参数即可改变处理功能,但其运算速度较慢;而硬件实现方法运算速

度快,可以达到实时处理的要求,但不够灵活。

采用专用单片机来实现数字信号处理的方法称为软/硬件相结合的实现方法,单片机配以数字信号处理软件,既灵活,速度又比软件方法快,特别适用于数字控制系统。目前发展最快、应用最广的方法是采用 DSP 芯片, DSP 芯片配有乘法器和累加器,结构上采用并行结构、多总线和流水线工作方式,且配有适合数字信号处理的高效指令,是一类可实现高速运算的微处理器, DSP 技术及其应用已成为信息处理学科研究的核心内容之一。

1.3 数字信号处理的应用领域

随着数字信号处理性能的迅速提高和产品成本的大幅下降,数字信号处理的应用范围不断扩大,几乎遍及整个电子领域并涉及所有的工程技术领域,其中常见的典型应用如下。

(1) **语音处理**。语音处理是最早应用数字信号处理技术的领域之一,也是最早推动数字信号处理理论发展的领域之一。语言处理主要包括语音信号分析、语音增强、语音合成、语音编码、语音识别和语音信箱等。

(2) **图形/图像处理**。数字信号处理技术已成功应用于静止图像、活动图像的恢复与增强、去噪、数据压缩和图像识别等,还应用于三维图像变换、动画、电子出版和电子地图等。

(3) **现代通信**。在现代通信技术领域,几乎所有分支都受到数字信号处理的影响。高速调制解调、编/译码、自适应均衡、多路复用等都广泛采用了数字信号处理技术。数字信号处理在传真、数字交换、移动电话、数字基站、电视会议、保密通信和卫星通信等领域也得到了广泛应用,并且随着互联网的迅猛发展,数字信号处理又在网络管理/服务和 IP 电话等新领域广泛应用,而软件无线电的提出和发展进一步增强了数字信号处理在无线通信领域的应用。

(4) **数字电视**。数字电视取代模拟电视、高清晰度电视的普及依赖于视频压缩和音频压缩技术取得的成就,而数字信号处理及其相关技术是视频压缩和音频压缩技术的重要基础。

(5) **军事与尖端科技**。雷达和声呐信号处理、雷达成像、自适应波束合成、阵列天线信号处理、导弹制导、GPS、航空航天和侦察卫星等无一不用到数字信号处理技术。

(6) **生物医学工程**。数字信号处理技术在生物医学中应用广泛,如心电图、超声波、CT 扫描、核磁共振和胎儿心音的自适应检测等。

(7) **电力系统**。通过对各种电力参数的采集和分析,可以判断输电线路中是否出现故障,进而确定故障发生的位置。

(8) **气体检测**。通过对有害、易燃、易爆气体的检测,可以预防气体泄漏,防止重大伤害的发生。常用方法包含可调谐二极管吸收光谱技术,具有稳定性强、准确性高的特点。

(9) **移动机器人控制**。机器人通过红外、激光、触觉、摄像头等传感器,把周围环境及自身姿态传送给处理器,控制系统对这些大量的实时信号进行处理,发出相应的操作指令,控制机器人避开障碍物,并按照规划的路径运动。

(10) **物联网**。通过信号处理及滤波可以消除物联网采集、传送信号中混杂的噪声,保证物联网的稳定运行。例如,远程医疗监测的心电图信号由于电源干扰,含有较大的电路噪声,此时可以采用数字信号处理技术滤除这些噪声,准确获取病人的身体机能指标。

(11) **其他领域**。除上述领域外,数字信号处理技术还在地球物理学、音乐制作、消费电子、仪器仪表和自动控制与监测等许多领域得到广泛应用。

1.4 数字信号处理的发展趋势

传统的数字信号处理方法都是在已知信号的时频或统计特性时，根据用途设计一种固定的滤波器，如低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器、带阻滤波器，仅通过调整少量的滤波器参数来适应不同数据类型的独自特点，是一种基于规则的信号处理技术。

近年来机器学习，特别是深度学习在计算机视觉、语音信号处理及识别方面展示出强大的能力，因此其同样也被逐渐引入数字信号处理领域。

与传统信号处理方法相比，机器学习特别是深度学习尽可能地减少了对数据的先验假设，是一种数据驱动的信号处理方法，能够准确地实现线性变化、卷积等信号处理，使得滤波过程变得更加灵活，更具有适应性。



绪论教学视频

第2章 时域离散时间信号与系统

时域离散时间信号是指时间上离散的信号,即只在某些不连续的规定时刻给出信号的函数值,而在其他时间信号没有定义。时域离散时间信号可以对时域连续信号采样得到,即在采样瞬间保留原来连续信号的幅度值,这种信号称为采样信号或抽样信号,其特点是在时间上是离散的,而在幅度上是具有无限精度的连续值。为了对信号进行数字化处理,必须按要求对其幅度的精度进行有限位量化,以便被数字系统所接受,这种时间上离散、幅度上被量化的信号称为数字信号。只有数字信号才能用数字系统进行各种处理,以达到分析、识别或使用的目的。

本章将对时域离散信号和系统的基本概念、基本分析方法进行讨论,这是学习后面各章内容的基础。

2.1 连续时间信号的采样

绪论中概述了数字信号处理技术相对于模拟信号处理技术的优点,因此人们通常希望首先对模拟信号进行采样和量化编码,形成数字信号,然后采用数字信号处理技术进行处理,这种处理方法称为模拟信号的数字处理方法。本节主要讨论信号的采样、采样定理和信号重建等问题。

2.1.1 信号的采样

离散时间信号通常是由连续时间信号经周期采样得到的。完成采样功能的器件称为采样器,图 2.1 所示为采样器示意图及波形图。图中 $x_a(t)$ 表示模拟信号, $\hat{x}_a(t)$ 或 $x_a(nT)$ 表示采样信号, T 为采样周期, $n=0,1,2,\dots$ 。一般可以把采样器视为一个每隔 T 秒闭合一次的电子开关 S 。理想情况下,开关闭合时间 τ 满足 $\tau \ll T$ 。实际采样过程可视为脉冲调幅过程, $x_a(t)$ 为调制信号,被调脉冲载波 $p(t)$ 是周期为 T 、脉宽为 τ 的周期脉冲串,如图 2.2(a)所示。 $\tau \rightarrow 0$ 时的理想采样情况如图 2.2(b)所示,它是实际采样的一种科学的、本质的抽象,同时可使数学推导得到简化。下面主要讨论理想采样。

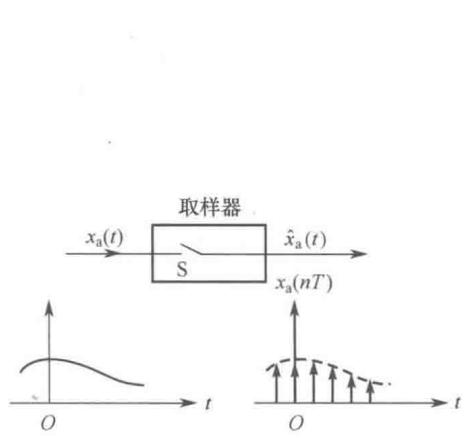


图 2.1 采样器示意图及波形图

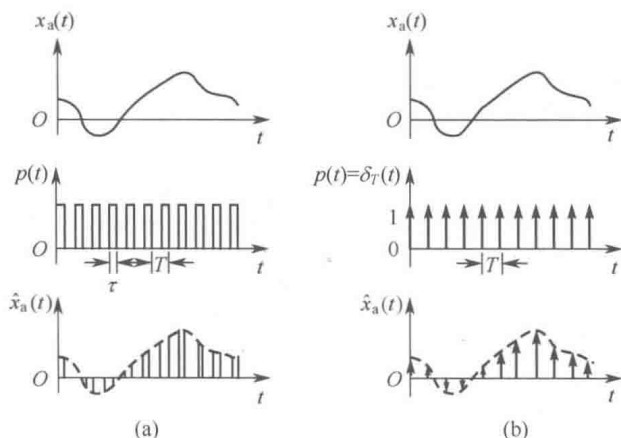


图 2.2 连续时间信号的采样: (a) 实际采样; (b) 理想采样

在 $\tau \rightarrow 0$ 的极限情况下, 采样脉冲序列 $p(t)$ 变成冲激函数序列 $\delta_T(t)$, 即

$$p(t) = \delta_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT) \quad (2.1)$$

理想采样同样可视为连续时间信号对脉冲载波的调幅过程, 因而理想采样输出 $\hat{x}_a(t)$ 可表示为

$$\begin{aligned} \hat{x}_a(t) &= x_a(t)p(t) \\ &= x_a(t) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT) \\ &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x_a(t) \delta(t - nT) \end{aligned} \quad (2.2)$$

由于 $\delta(t - nT)$ 只在 $t = nT$ 时非零, 所以上式中 $x_a(t)$ 只有在 $t = nT$ 时才有意义, 故有

$$\hat{x}_a(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x_a(nT) \delta(t - nT) \quad (2.3)$$

2.1.2 采样定理

模拟信号经过采样变为离散时间信号后, 是否会丢失一些信息? 信号的频谱会发生怎样的变化? 不丢失信息应满足什么条件? 这些问题关系到能否用数字化方法对连续时间信号进行处理。采样定理将全面回答这些问题。

下面首先讨论采样信号与模拟信号频谱之间的关系。将周期冲激函数序列 $p(t) = \delta_T(t)$ 展开成傅里叶级数得 $p(t) = \sum_{r=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT) = \sum_{r=-\infty}^{+\infty} c_r e^{jr\Omega_s t}$, 级数的基波频率即采样频率为 $f_s = 1/T$, 采样角频率为 $\Omega_s = 2\pi/T$, 其傅里叶系数 c_r 为

$$\begin{aligned} c_r &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} p(t) e^{-jr\Omega_s t} dt \\ &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT) e^{-jr\Omega_s t} dt \\ &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \delta(t) e^{-jr\Omega_s t} dt = \frac{1}{T} e^0 = \frac{1}{T} \end{aligned}$$

于是 $p(t)$ 可表示为

$$p(t) = \frac{1}{T} \sum_{r=-\infty}^{+\infty} e^{jr\Omega_s t} \quad (2.4)$$

则 $p(t)$ 的傅里叶变换为

$$P(j\Omega) = F\left[\frac{1}{T} \sum_{r=-\infty}^{+\infty} e^{jr\Omega_s t}\right] = \frac{2\pi}{T} \sum_{r=-\infty}^{+\infty} \delta(j\Omega - jr\Omega_s) \quad (2.5)$$

根据傅里叶变换的卷积定理, 可得出理想采样信号 $\hat{x}_a(t)$ 的频谱为

$$\begin{aligned} \hat{X}_a(j\Omega) &= F[x_a(t) \cdot p(t)] = \frac{1}{2\pi} X_a(j\Omega) * P(j\Omega) \\ &= \frac{1}{T} \sum_{r=-\infty}^{+\infty} X_a(j\Omega) * \delta(j\Omega - jr\Omega_s) \\ &= \frac{1}{T} \sum_{r=-\infty}^{+\infty} X_a(j\Omega - jr\Omega_s) \end{aligned} \quad (2.6)$$

由式 (2.6) 可以看出, 采样信号的频谱 $\hat{X}_a(j\Omega)$ 是模拟信号频谱 $X_a(j\Omega)$ 的周期延拓, 周期为采