



普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材

digital signal
processing

数字信号处理

◎ 张维玺 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电气工程与自动化（应用型）“十二五”规划教材

数 字 信 号 处 理

张维玺 等编著



机 械 工 业 出 版 社

数字信号处理是从 20 世纪 60 年代以来,随着现代信息科学和计算机技术的进步与集成电路技术的发展而迅速发展起来的一门新兴学科。数字信号处理在各个方面得到了广泛应用,其重要性在多个领域中日益体现。数字信号处理是信息工程、电子科学、通信工程等电子信息类专业必须掌握的专业基础知识和必修内容。因此,数字信号处理这门课程得到了高度的重视,几乎所有的工科院校都开设了这门课程,国内外也出版了很多的教材。而本书作为工科类电气信息各专业本科二、三年级的教材,着重基本原理的阐述,力求使基本概念与工程技术紧密联系,保持经典性与先进性之间的协调。

本书包括五部分内容:第一部分包括前两章和第 9 章,内容是离散时间信号与系统的基础理论;第二部分包括第 3、4 章,讨论的是快速傅里叶变换算法;第三部分包括第 5、6、7 章,讨论的是 IIR 及 FIR 型数字滤波器的设计;第 8 章构成第四部分,讨论有限字长效应,是数字信号处理的误差分析基础;第 10 章是实验,构成第五部分。本书主要作为大专院校电气信息类专业的教材,或者作为相近专业选修课教材;也可作为有关科技人员在数字信号处理方面的参考书。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师发邮件到 jinacmp@163.com 索取,或登录 www.cmpedu.com 注册下载。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理/张维玺编著. —北京:机械工业出版社, 2011.8
普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-34686-9

I. ①数… II. ①张… 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(2011)第 088452 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:吉玲 责任编辑:吉玲 王寅生

版式设计:霍永明 责任校对:李秋荣

封面设计:张静 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2011 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·14.25 印张·349 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-34686-9

定价:27.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

数字信号处理是利用计算机或专用处理设备,以数值计算的方法对信号进行分析、变换、综合、估计与识别等的加工处理,达到提取信息和便于利用的目的。由于数字信号处理技术具有灵活、精确、抗干扰性强,在功能上有许多模拟处理所不具备的优点,所以近年来在语音、雷达、声纳、地震、图像、通信系统、控制系统、医学生物、交通运输、地质勘探、机械振动、宇宙航行、遥感遥测、水利工程、产品检验、故障检测以及自动测量仪器等各个领域获得极其广泛的应用。它有效地推动各工程技术领域的技术和学科发展,引起人们的重视。随着器件的更新,微计算机技术的进步以及实际中对信息处理越来越高的要求,近年来新算法不断出现,理论上逐步成熟,已经形成了具有强大生命力的技术科学。

众所周知,随着科学技术的发展,知识积累越来越多,知识老化与更新的速度也越来越快。因此,编写本书一是为了帮助从事信息处理工作多年,而又具有一定理论基础的广大工程技术人员,在较短时间内对数字信号处理技术有个基本了解,以改变知识老化的状态,达到知识更新的目的;二是考虑到数字信号处理技术的应用日益广泛和深入,几乎在每一工程技术领域都要用到它,所以为了促进生产发展,达到开拓新的应用领域的目的。

数字信号处理技术是一类理论性与技术性都比较强的学科,内容丰富、发展迅速,所牵涉的知识面很广。它包括对离散系统的分析、综合与技术实现,既讨论理论问题又讨论实际问题。在处理对象只涉及确定性信号不讲随机信号;对处理方法不仅涉及时域、频域还有空域;对技术实现既需要数字硬件知识又需要软件知识,而以上这些知识往往分散在许多先修课程之中。为了能使缺乏这些先修知识的读者更好地理解而又能在有限的篇幅内达到上述目的,本书尽量做到:①内容衔接梯度小,便于自学,易于理解;②内容的取舍可浅、可深,灵活性大,适应面广,但重在基础;③重视实际应用,尽可能反映近年来国内外在这一学科领域的成果与动向,以利开阔思路,为进一步开拓新的应用领域打下基础。

本书是作者在开设数字信号处理课程中,总结该课程的教学实践经验编写而成。数字信号处理是一门专业基础课,可作为电气信息类专业本科生的必修课教材或相近专业本科生选修课教材。为了使读者能掌握离散时间信号和系统的基本理论、基本分析方法以及FFT、数字滤波器等数字信号处理技术,本书的选材少而精,物理概念阐述清楚,叙述问题深入浅出,初学者易于接受和自学。

与本书相关的先修课是“信号与系统”、“工程数学论”等。书中有些内容,如差分方程、 z 变换等,可以根据学生先修课情况,作适当的省略或补充。

本书主要内容为离散时间信号与系统的分析、数字滤波器设计、快速傅里叶变换以及有限字长效应。第一部分包括第1、2、9章,是全书的基础部分,通过这一部分的学

习,读者能建立起离散时间信号与系统的基本概念,并初步掌握时域和频域的基本分析方法,是离散时间系统设计的基础知识。第二部分包括第3、4章,介绍数字信号处理中最典型,并且使用最广泛的一种线性变换工具——快速傅里叶变换,通过这部分的学习读者能进一步认识运算效率在数字信号处理中的重要地位。第三部分包括第5、6、7章,讨论的是IIR及FIR型数字滤波器的设计。第四部分为第8章,是数字系统及信号处理中误差与精度分析的基础,是非线性问题,同时还涉及一定的硬件知识和统计分析等多方面的内容,是比较深入的知识。第五部分是实验。在使用本教材时,应以前四部分为主,尤其第一部分是学好后续内容的保证,第四部分与前三部分有较大不同,相对比较独立,因此教授时,应根据学生的具体情况,采取全授、选授、不授或将部分内容移到高班选修课或研究生课中去讲授。在讲授本课程时应重视习题练习,有条件的学校应尽可能多选择一些习题来安排学生上机演习,使学生得到较多的计算机训练。同时第1、2、3、9章可以作为“信号与系统”课程的离散时间信号系统部分,只要在“信号与系统”课程中讲完连续时间信号系统部分后直接用此教材就避免了内容的重复,节约了课时,便于学生理解、比较、记忆和对信号信息处理内涵的升华。

本书由张维玺、武晓春、张俐、刘舒祺老师编写,西安石油大学电子工程学院张乃禄教授审阅了初稿并提出了许多宝贵意见,在此谨向他们表示衷心的感谢。

由于我们水平有限,书中错误在所难免,诚恳欢迎读者批评指正。

作 者

目 录

前言

第 1 章 绪论 1

1.1 引言 1

1.2 数字信号处理的理论 1

1.2.1 信号 1

1.2.2 系统 2

1.2.3 数字信号处理的理论 2

1.3 数字信号处理的实现 3

1.4 数字信号处理的应用 4

1.4.1 数字信号处理系统的突出优点 4

1.4.2 数字信号处理的典型应用 5

本章小结 9

习题 9

第 2 章 离散时间信号与 z 变换 10

2.1 采样 10

2.1.1 信号的采样 10

2.1.2 采样定理 11

2.1.3 折叠频率与奈奎斯特 (Nyquist) 频率 14

2.1.4 信号的恢复 15

2.1.5 采样内插公式 15

2.2 离散时间信号 16

2.2.1 序列的表示法 16

2.2.2 序列的运算规则及符号表示 17

2.2.3 常用的典型序列 18

2.3 离散时间系统与差分方程 21

2.3.1 离散时间系统及卷积运算 21

2.3.2 卷积运算的基本规律 24

2.3.3 系统的稳定性和因果性 25

2.3.4 常系数线性差分方程 26

2.4 z 变换 29

2.4.1 z 变换的定义 30

2.4.2 z 变换的收敛域 31

2.5 z 变换的定理与特性 35

2.5.1 线性特性 35

2.5.2 序列的移位 36

2.5.3 乘指数序列 36

2.5.4 $X(z)$ 的微分 36

2.5.5 复数序列的共轭 36

2.5.6 初值定理 36

2.5.7 终值定理 37

2.5.8 序列的卷积 37

2.5.9 序列乘积的 z 变换——复卷积定理 37

2.5.10 帕塞瓦 (Parseval) 定理 39

2.6 拉普拉斯变换, 傅里叶变换及 z 变换 40

2.6.1 序列的 z 变换与拉普拉斯变换的关系 40

2.6.2 序列的 z 变换与傅里叶变换的关系 42

2.6.3 序列的傅里叶变换与拉普拉斯变换 (双边) 的关系 42

2.7 系统函数 43

2.7.1 系统函数的定义 43

2.7.2 系统函数和差分方程的关系 43

2.7.3 系统函数的收敛域 44

2.7.4 系统频率响应的几何确定法 44

2.7.5 无限长单位脉冲响应 (IIR) 系统与有限长单位脉冲响应 (FIR) 系统 49

本章小结 51

习题 51

第 3 章 离散傅里叶变换 (DFT) 56

3.1 离散傅里叶级数变换 (DFS) 56

3.1.1 离散傅里叶级数变换引入 56

3.1.2 离散傅里叶级数的主要性质 56

3.2 离散傅里叶变换的定义和性质 59

3.2.1 离散傅里叶变换的定义 59

3.2.2 离散傅里叶变换的性质 60

3.3 频域取样 63

3.3.1 对 $X(z)$ 取样时取样点数的限制 63

3.3.2 $X(z)$ 的内插公式 64

3.4 离散傅里叶变换的应用 66

3.4.1 用 DFT 计算线性卷积	66	5.4.3 模拟滤波器的数字化方法	107
3.4.2 用 DFT 对信号进行谱分析	67	5.5 双线性变换法	109
本章小结	67	5.5.1 变换原理	109
习题	67	5.5.2 逼近的情况	110
第 4 章 快速傅里叶变换	71	5.5.3 模拟滤波器的数字化方法	112
4.1 引言	71	5.6 滤波器的频率变换法	115
4.2 基-2 时域抽选 (DIT) FFT 算法	72	5.6.1 模拟低通滤波器变换成数字低通 滤波器	116
4.2.1 算法原理	72	5.6.2 模拟低通滤波器变换成数字高通 滤波器	117
4.2.2 运算特点	75	5.6.3 模拟低通滤波器变换成数字带通 滤波器	120
4.2.3 矩阵分解表示	76	5.6.4 模拟低通滤波器变换成数字带阻 滤波器	123
4.2.4 编程思想	77	5.7 滤波器的 z 平面变换法	126
4.2.5 硬件实现	80	5.7.1 数字低通变换成数字低通	127
4.3 基-2 频域抽选 (DIF) FFT 算法	81	5.7.2 数字低通变换成数字高通	127
4.4 离散傅里叶反变换 (IDFT) 的快速算 法	83	5.7.3 数字低通变换成数字带通	128
4.5 任意基 FFT 算法	84	5.7.4 数字低通变换成数字带阻	129
4.5.1 抽选分解的一般原理	84	本章小结	129
4.5.2 基-4DIF-FFT 算法	86	习题	129
4.6 调频 z 变换	86	第 6 章 有限长单位脉冲响应 (FIR) 滤波器设计	131
4.6.1 问题的提出	86	6.1 线性相位 FIR 滤波器的特点	131
4.6.2 算法原理	87	6.1.1 线性相位特性	131
4.6.3 CZT 的实现步骤	88	6.1.2 幅度响应特性	133
4.6.4 CZT 运算量的估算	90	6.1.3 线性相位 FIR 滤波器的零点位置	136
4.6.5 CZT 算法的特点	91	6.1.4 举例	137
4.7 其他的快速计算方法	91	6.2 窗口法	140
4.7.1 重叠相加法	92	6.2.1 窗口法的基本思想	140
4.7.2 重叠保留法	92	6.2.2 理论分析	140
4.7.3 线性卷积的 FFT 算法	93	6.2.3 几种常用窗函数	142
本章小结	93	6.2.4 设计方法小结	145
习题	94	6.3 频率采样法	148
第 5 章 无限长单位脉冲响应 (IIR) 滤波器设计	96	6.3.1 线性相位的约束	149
5.1 IIR 滤波器设计的特点	96	6.3.2 逼近误差及其改进措施	150
5.2 模拟滤波器的设计	97	6.4 IIR 与 FIR 滤波器的比较	153
5.2.1 由幅度响应函数来确定系统 函数	98	本章小结	154
5.2.2 巴特沃思低通逼近	98	习题	154
5.2.3 切比雪夫低通逼近	102	第 7 章 数字滤波器的基本结构	156
5.3 IIR 滤波器设计的特点	104	7.1 数字滤波器的表示方法	156
5.4 脉冲响应不变法	106	7.2 IIR 滤波器的结构	158
5.4.1 变换原理	106		
5.4.2 混叠失真	107		

7.2.1 直接型结构	159	本章小结	183
7.2.2 基本二阶节的级联结构和并联 结构	159	习题	184
7.3 FIR 滤波器的结构	160	第 9 章 离散时间系统的状态空间 分析	186
7.3.1 横截型结构	160	9.1 引言	186
7.3.2 级联型结构	161	9.2 离散时间系统的状态空间描述	186
7.3.3 频率抽样型结构	162	9.3 离散时间系统的状态空间方程的 建立	187
7.3.4 快速卷积型结构	164	9.4 状态空间方程的 z 域求解	188
本章小结	164	9.5 离散时间系统的状态空间方程的时 间域求解	190
习题	164	9.6 离散时间系统的稳定性	191
第 8 章 数字信号处理中的误差与量化 效应	166	9.7 离散时间系统的状态空间分析法	195
8.1 二进制算法与运算误差	166	本章小结	196
8.1.1 定点制表示及运算误差	166	习题	196
8.1.2 浮点制表示及运算误差	166	第 10 章 实验	198
8.1.3 负数表示法	167	10.1 MATLAB 软件简介	198
8.1.4 截尾与舍入产生的误差	167	10.2 实验一 离散时间信号的产生	198
8.2 A-D 转换的量化效应	170	10.3 实验二 离散时间 LTI 系统的时域 分析	202
8.2.1 A-D 转换量化噪声的定义	170	10.4 实验三 离散时间信号的频域 分析	203
8.2.2 量化噪声通过线性系统	172	10.5 实验四 离散时间 LTI 系统的 z 域 分析	205
8.3 FFT 定点制运算中的有限字长 效应	173	10.6 实验五 FFT 算法与应用	207
8.3.1 输出信噪比	173	10.7 实验六 IIR 数字滤波器的设计	210
8.3.2 改善信噪比的方法	174	10.8 实验七 FIR 数字滤波器的设计	212
8.4 FFT 浮点制运算中的有限字长效应	175	附录 MATLAB 主要命令函数表	214
8.5 系数量化对数字滤波器的影响	178	参考文献	219
8.5.1 滤波网络中系数的量化效应	178		
8.5.2 滤波网络中运算的量化效应	179		
8.6 系数量化对 FFT 的影响	182		

第1章 绪 论

1.1 引言

过去, 信号处理一直是采用模拟设备来完成的。近代, 数字计算机的出现和大规模集成技术的高度发展, 为信号处理提供了强有力的手段。在电子技术各个领域, 例如雷达、声纳、语言通信、数字通信等, 正日益广泛地用数字方法代替模拟方法实现信号处理。因而, 从20世纪60年代以来, 逐渐形成了一门新的学科——数字信号处理 (Digital Signal Processing, DSP)。

目前在国内外绝大部分重点工科院校中, 都已把“数字信号处理”列为技术基础课, 作为部分专业研究生和本科生的必修课和选修课。特别是国外的重点高校, 都建立有信号处理中心, 把教学、科研、人才培养紧密结合起来, 不但在理论上而且在实际运用上都取得了丰硕的成果。目前, 以DSP芯片及外围开发设备为主, 正在形成一个具有较大潜力的产业市场。

简单地说, 数字信号处理是利用计算机或专用处理设备, 以数值计算的方法对信号进行采样、变换、综合、估值与识别等加工处理, 借以达到提取信息和便于应用的目的。

众所周知, 几乎所有的工程技术领域都要涉及信号问题, 这些信号包括电的、磁的、机械的、热的、声的、光的及生物体的等各个方面。如何在较强的背景噪声下提取出真正的信号或信号的特征并将其应用于工程则是信号处理技术要完成的任务。可以说, 信号处理几乎涉及所有的工程技术领域。

1.2 数字信号处理的理论

1.2.1 信号

信号可定义为一承载信息的函数, 其自变量常取为时间, 虽然事实上它可以不代表时间, 但是也不一定只限于有一个自变量。除了时间变量外, 信号还可以是以空间坐标为变量的函数。例如, 图像信号是一个时间变量和二元空间变量表示的一个亮度函数。信号常分为

(1) 连续时间信号。在规定的连续时间内, 信号的幅值可以是连续值, 也可以是离散值的信号。连续时间信号与模拟信号经常用来说明同一信号, 可以互相通用。模拟信号可视为连续时间信号的一个特例。

(2) 模拟时间信号。在连续时间范围内, 信号的幅值可以取连续范围内任意数值, 即时间连续, 幅度也连续的信号。

(3) 离散时间信号。在一组离散的时间下表示信号数值的函数。因为最常遇到的离散信号是模拟信号, 在时间上以均匀 (有时也非均匀) 间隔的取样, 所以离散时间信号又称为取样信号或序列。

(4) 数字信号。在时间上和幅度上都经过量化变为二进制数码序列的信号。量化是利用一组数值来表示变量的过程。所谓量化变量，时间上就是一组不同的数值。因此，数字信号处理可以用序列的数来表示，而每一个数又是由有限个数码来表示的。

离散时间信号与数字信号也经常用来说明同一信号。离散时间信号的一些理论也适用于数字信号。

(5) 信号处理。信号处理是对信号进行分析、变换、综合、识别等加工处理，以达到提取信息和便于利用的目的。信号处理的目的：从观测到的（包括含有噪声与干扰）信号中提取信息，根据需要并以适当形式表现出来。

例如，图 1-1 是一个简单的数字高通滤波器，它是由一个加法器、一个乘法器和一个延时器组成的。

(6) 数字信号处理。处理就是变换。数字信号处理是采用数值计算的方法，完成对信号的处理。从某种观点来看，数字信号处理是多种计算机算法的汇编，因此可以认为它是计算数学的另一分支，即处理的实质是运算。

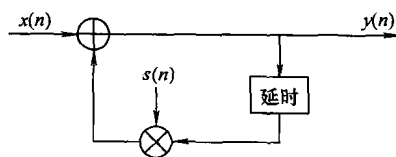


图 1-1 简单的数字高通滤波器

数字信号处理的过程为

$$x(t) \xrightarrow{\text{A-D}} x(n) \longrightarrow y(n) \xrightarrow{\text{D-A}} y(t)$$

处理器可能是一台计算机或数字系统，如

$$X(n) \longrightarrow \boxed{h(n)} \longrightarrow y(n) = X(n) * h(n)$$

软件实现比较方便，一台计算机可以进行多种信号运行运算。如：

$$X(n) = \begin{cases} X(n) & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$y(n) = \sum_{m=0}^{N-1} X(m) h(n-m)$$

1.2.2 系统

几乎在科学技术的每一个领域，为了信号的提取，都必须进行信号处理。凡是反映信号处理因果关系和设备或运算都称为系统，它在受到输入信号的激励时产生输出信号。输入信号又被称为激励，输出信号又被称为响应，如图 1-2 所示。

系统是一个被过度使用的名词。在讨论信号处理时所谈论的系统是指被用来作为分析或处理的对象，为了不至于混淆，把这种系统称为物理系统；用来对信号进行分析和处理的系统，则是信号处理系统。

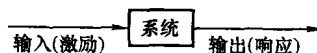


图 1-2 信号处理系统

1.2.3 数字信号处理的理论

数字信号处理在理论上所涉及的范围极其广泛。在数学领域中，微积分、概率统计、随机过程、高等代数、数值分析、复变函数等都是它的基本工具，网络理论、信号与系统等均是它的理论基础。在学科发展上，数字信号处理又和最优控制、通信理论、故障诊断等紧紧

相连,近年来成为人工智能、模式识别、神经网络等新兴学科的理论基础之一,其算法的实现(无论是硬件还是软件)又和计算机学科及微电子技术密不可分。因此可以说,数字信号处理是把经典的理论体系(如数学、系统)作为自己的理论基础,同时又使自己成为一系列新兴学科的理论基础。

在国际上,一般把1965年快速傅里叶变换(FFT)的问世,作为数字信号处理这一新学科的开端。在近50年的发展中,数字信号处理自身已基本上形成一套较为完整的理论体系。这些理论包括:

- (1) 信号采集(A/D技术、抽样定理、多抽样率、量化噪声分析等);
- (2) 离散信号的分析(时域及频域分析、各种变换技术、信号特征的描述等);
- (3) 离散系统分析(系统的描述、系统的单位抽样响应、转移函数及频率特性等);
- (4) 信号处理中的快速算法(快速傅里叶变换、快速卷积与相关等);
- (5) 信号的估值(各种估值理论、相关函数与功率谱估计等);
- (6) 滤波技术(数字滤波器的设计与实现);
- (7) 信号的建模(最常用的有AR、MA、ARMA、PRONY等模型);
- (8) 信号处理中的特殊算法(如抽取、插值、奇异值分解、反卷积、信号重建等);
- (9) 信号处理技术的实现(软件实现与硬件实现);
- (10) 信号处理技术的应用。

由上述10个方面可以看出,信号处理的理论和算法是密不可分的。把一个好的信号处理理论用于工程实际,需要辅以相应的算法从而达到高速、高效及简单易行的目的。例如,FFT算法的提出使DFT理论得以推广,Levinson算法的提出使Toeplitz矩阵的求解变得很容易,从而使参数模型谱估计技术得到广泛应用。这样的例子在信号处理中还可以举出很多。

数字信号处理中所涉及的信号包括确定性信号、平稳随机信号、时变信号、一维及多维信号、单通道及多通道信号。所涉及的系统也包括一维系统、二维系统、多通道系统,对每一类特定的信号与系统,上述理论的各个方面又有不同的内容。

伴随着通信技术、电子技术及计算机的飞速发展,数字信号处理的理论也在不断地丰富和完善,各种新算法、新理论正在不断地被提出,可以预计,在今后的10年中,数字信号处理的理论将获得更快地发展。

1.3 数字信号处理的实现

数字信号处理的主要对象是数字信号,且是采用运算的方法达到处理目的的。数字信号处理的实现,大体上有如下几种方法:

(1) 在通用的微计算机上用软件来实现。软件可由使用者自己编写,也可使用已有的商品化软件包。自IEEE DSP Comm于1979年推出第一个信号处理软件包以来,许多研究机构、公司也在推出不同语言、不同用途的信号处理软件包。这种实现方法速度较慢,多用于教学与科研。

(2) 用单片机来实现(可以称为软硬件结合)。目前单片机的发展速度很快,其功能也很强,配以数字信号处理软件,既灵活,速度又比软件方法快。依靠单片机的硬件环境配以

信号处理软件可用于实际工程，如数字控制、医疗仪器等。

(3) 利用专门用于信号处理的 DSP 芯片来实现。DSP 芯片较之单片机有着更为突出的优点，如内部带有乘法、累加器，采用流水线工作方式及并行结构，多总线，速度快，配有适于信号处理的指令等，是一类可实现高速运算的微处理器。DSP 芯片的问世及飞速发展，为信号处理技术应用于实际工程提供了可能。可以说，用 DSP 芯片实现数字信号处理，正在变成或已经变成工程技术领域中的主要方法。

(4) 利用特殊用途的 DSP 芯片来实现。现在国际上已推出专门用于 FFT、FIR 滤波、卷积等专用芯片，其软件算法已在芯片内部用硬件电路实现，使用者给出输入数据，可在输出端直接得到结果。

软件实现指的是按照原理和算法，自己编写程序或者采用现成的程序在通用计算机上实现；硬件实现指的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、控制器、存储器以及输入/输出接口部件实现的一种方法。显然前者灵活，只要改变程序中的有关参数即可，例如只要改变图 1-1 中的参数，数字滤波器可能就是低通、带通或高通滤波器，但是运算速度慢，一般达不到实时处理，因此，这种方法适合于科研和教学。后者运算速度快，可以达到实时处理要求，但是不灵活。

综上所述，如果从数字信号处理的实际应用情况和发展考虑，数字信号处理的实现方法分成三类，一类是软件实现，一类是软硬结合，一类是硬件实现。而硬件实现指的是选用合适的 DSP 芯片，配有适合芯片语言及任务要求的软件，实现某种信号处理功能的一种方法。这种系统无疑是一种最佳的数字信号处理系统。

借助于图 1-3 所示的简单系统来说明数字信号处理的过程。

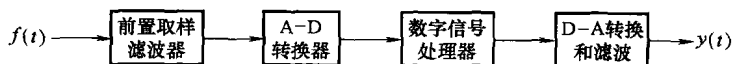


图 1-3 数字信号处理系统的简单框图

1.4 数字信号处理的应用

1.4.1 数字信号处理系统的突出优点

由于数字信号处理的对象是数字信号，处理的方式是数值运算，因而使它具有许多显著的优点。

(1) 精度高。模拟网络中元件精度很难达到 10^{-3} ，而数字系统 17 位字长就可以达 10^{-5} 精度。在一些高精密的系统中有时只有采用数字技术才可达到精度要求。如雷达技术中的脉冲压缩，要求主、副瓣之比达 35dB 或 40dB，在理论上是可行的，但在采用模拟处理时，由于元件精度的限制，只能做到 30dB 左右。当采用数字脉压时，在 $\tau = 500\mu\text{s}$ ，压缩比 $D = 1024$ ，模-数转换器用 8 位时，其主、副瓣之比却可达 40dB，且动态范围可达到 60dB。

(2) 灵活性大。数字系统的性能主要决定于乘法器的各系数，而这些系数是存放在系数存储器中的。改变所存放的系数，就可得到不同的系统，这比改变模拟系统的特性容易得多，是模拟系统所不可比拟的。

(3) 可靠性强。因为数字系统只有两个信号电平，1 和 0，受噪声及环境条件影响小，

不像模拟系统参数都有一定的温度系数,易受环境条件,如温度、振动、电磁感应等影响。再者,数字系统多采用大规模集成电路,其故障率远比采用众多分立元件构成的模拟系统的故障率低。

(4) 易于大规模集成。因数字部件具有高度规范性,便于大规模集成,大规模生产,且数字电路主要工作在晶体管截止和饱和状态,对电路参数要求不严格,因此产品的成品率高,价格日趋降低。特别在一些用模拟网络进行的低频信号的处理中,网络的电感和电容的数值大到惊人的程度,甚至不能很好地实现,这时采用数字滤波器,在体积、重量和性能方面,将显示出其优越性。

(5) 可以时分复用提高效率。数字系统可以按时间顺序同时处理几路独立的信号,构成时分复用,如图 1-4 所示。因此对于每一路信道来说,都好像单独占用着处理器一样。处理器的运算速度越高,它能同时处理的信道数也越多。

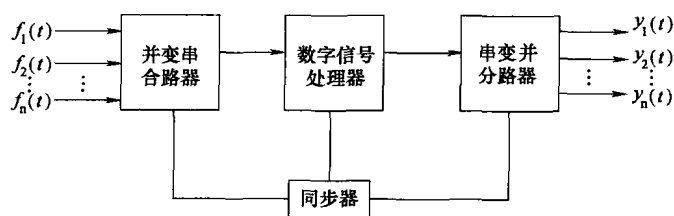


图 1-4 时分复用多路数字信号处理系统

(6) 突破模拟系统的束缚。模拟系统不能实现非因果系统,如理想低通滤波器,而且严格的相位特性也不能实现。而计算机不进行实时处理(可以储存起来,对模拟系统就不行了)。FIR 滤波器可作出严格的线性相位系统。

(7) 高性能。数字信号处理可以获得很高的性能指标。例如, FIR 数字滤波器可以有十分严格的线性相位,这在模拟系统是无法达到的。

(8) 能进行多维处理。利用庞大的存储单元,存储数帧图像信号,实现多维信号的处理。

事物总是一分为二的,数字信号处理也不可避免地存在着不足之处,主要是其处理速度还不够高,不能处理很高频率的信号,一般只能限于几十兆赫以下的信号;其次是算法复杂、运算量大,硬件系统的设计和结构还比较复杂,所以价格比较昂贵。

1.4.2 数字信号处理的典型应用

数字信号处理是最近二三十年来发展最为迅速的新兴学科之一。进入 20 世纪 70 年代以来,随着大规模集成电路和计算机技术的飞速发展,数字信号处理在科学和工程技术的诸多领域得到了广泛的应用。通信、雷达、声纳、遥感、图像处理和模式识别、语音处理和识别、地球物理、资源考察、人工智能、核技术、生物医学工程、机器人、自动控制、消费类电子等无一不与数字信号处理有关。

特别是进入 20 世纪 90 年代以后,随着高档消费类声像设备的发展,特别是多媒体技术的发展,使计算机、通信、声像产品有机地融合在一起,成为未来电子产品的主要发展趋势,数字信号处理也因此进入了大发展时期。1992 年以来,单片信号处理器的年平均增长率高达 30%,1996 年的总销售额已高达 23 亿美元。

综上所述,数字信号处理涉及众多学科,又应用于众多领域的新兴学科,它既有较为完整的理论体系,又以最快的速度形成自己的产业。因此,这一新兴学科有着极其美好的发展

前景,并将为国民经济多个领域的发展做出自己的贡献。

为了更好地理解数字信号处理及其面临的任务,下面给出一些典型应用。

1. 远程通信

远程通信的任务就是把多种信息,如音频、视频信号,以计算机文件格式和其他类型的数据信息从一个地方传输到另一个地方。为了传输信息,通常需要一个在两地间建立联系的信道。信道可以是电话线、光纤、互联网络或大气等。长途通信公司为客户提供这些信息的传输业务,但他们必须建立和维护这一传输信道。其中的利益规则既简单又明确,在单一信道上能够传输的信息越多,就越有效益。DSP 使得远程通信在很多方面发生了革命性的变化,如信号铃音的生成和检测,频带搬移,滤除电源线的交流干扰等。

(1)多路技术。全世界大约有 10 多亿部电话。当一个用户按下几个数字键后,电话交换网络允许这一部电话与世界上任何一部电话在几秒钟内建立连接。这种连接的复杂程度是难以想象的。直到 20 世纪 60 年代,任意两部电话之间的连接依然需要通过继电式交换机和传输模拟语音信号,一次连接就需要一对电话线。DSP 技术使这种情况发生了根本的变革,它将模拟音频信号转化为数字数据码流,因为数据码流容易编码和解码,因此,可以实现多路电话同时通过一根电线传输。例如所谓的 T 载波标准能够同时传输 24 路语音,每路语音采用 8 位压缩扩展(对数压缩)模-数转换算法,采样频率为 8000 次/s,因此每路语音就有 64 000bit/s,24 路语音每秒就包含 1.544Mbit 的数据量。

(2)压缩。当一路语音被 8000 次/s 的采样和量化(数字化)后,其中还包含许多冗余数据,即一个样本值所包含的信息被其邻近的采样点大量复制。现已发展出多种 DSP 算法,可以用较低的比特率将语音信号转化为数据码流,这就是所谓的数据压缩算法。与之相对应的解压缩算法则从数据码流中恢复出原语音信号。这些算法因为各自的压缩比和压缩后的语音质量不同而不同。总的说来,(64~32)kbit/s 的传输率不会导致语音质量的损失。当压缩到 8kbit/s 时,声音将会受到影响,但是仍然可以接受。目前最高的可实现的压缩是 2kbit/s,虽然会导致声音的严重失真,但仍然在某些方面有应用前景,如军用和海底通信。

(3)回声抑制。回声是长途电话通信中存在的一个严重问题。当打电话时,语音信号经过信道(电信网络)传输到达接收机,但同时还会有部分信号作为回声又经信道反射回去。对回声信号而言,如果连接只有几百千米,那么回声经过的时间只有几毫秒。人耳习惯于延迟很小的回声,这时的声音听起来还算正常。但当通话距离变得更长时,回声就会变得越来越明显,比如在洲际通话中,这种延迟将会达到几百毫秒而且特别让人讨厌。现在,应用 DSP 技术可以很好地解决这一问题,方法是通过测量回声信号并且发出一种合适的反相信号来抵消回声。同样的技术也允许免提电话能够在讲话的同时听电话,而没有刺耳的音频反馈(即啸叫声)。这种技术还可以通过产生数字化的反相噪声来抵消或减小环境噪声。

2. 回声定位

要获得一个远处物体信息的常用方法是截获它的反射波。例如,雷达发射射频脉冲,并且通过截获来自飞行器的反射波(回波)来探测目标。声纳则通过波在水中的传播来探测潜水艇及其他水下物体。长期以来,地球物理学家通过人工引发爆炸后,拾取来自地下深处岩层的回声来研究地球。这些应用都面临各自领域特定的问题和需求。

(1)雷达。在简单的雷达系统中,一个无线电发射机发射一束毫秒级波长的射频能量脉冲,这一脉冲信号被馈入方向性极强的天线后向外辐射。在波束传播路径上若有飞行器,则

有一小部分辐射能量会被反射回接收天线。根据发射脉冲和接收到的回波信号之间的时间差,就可以计算出飞行器的距离。确定物体的方向更加简单,事实上它就是收到回波时接收天线的指向。

雷达系统的探测距离由两个参数决定:初始脉冲的能量和接收机的噪声电平。问题在于,增加脉冲能量将使脉冲变长;脉冲过长,则会降低测量经过时间的准确度。这就导致了两个重要参数之间的矛盾:远距离探测物体的能力和精确测量物体距离的能力。DSP 对雷达技术产生了三个方面的革命性影响,它们都与这一基本问题有关。首先,在接收到回波信号之后,运用 DSP 技术能够压缩脉冲,从而可以在不减少雷达探测距离的前提下提供精确的测距。第二,运用 DSP 技术能够对接收到的回波信号进行滤波以减少噪声,这将增加雷达探测的距离而无需降低测距的精度。第三, DSP 技术能够快速选择和产生不同波形和波长的脉冲,从而优化脉冲,满足特殊探测任务的需要。其实,与现代雷达的工作频率相比较,高达数百兆赫兹的采样频率对高速硬件的要求就显得和 DSP 算法一样重要了。

(2)声纳。声纳分为两类:主动声纳和被动声纳。在主动声纳中,2~40kHz 的声波脉冲在水中被发射,同时对声波的回波信号进行检测和分析。通常情况下,主动声纳的最大探测距离是10~100km。其应用包括:探测并定位水下物体,导航,通信,绘制海底地形图等。相比之下,被动声纳只能监听水下声音,如自然漩涡、海洋生物、潜艇和水面舰发出的机械声音。因为被动声纳不发射能量,这就意味着可以侦测到他人,却不被他人所发现,因此,具有理想的隐蔽效果。被动声纳最重要的应用是军事监测,如探测并跟踪潜水艇。被动声纳所用的频率比主动声纳的低,其作用范围可达几千千米。

DSP 使声纳在很多方面发生了与雷达相同的变革:脉冲发生、脉冲压缩、回波信号的滤波等。对声纳的认识,一种观点认为声纳比雷达更简单,因为它的工作频率更低;但另一种观点却认为声纳比雷达更复杂,因为它所在的环境特征是不均匀和不稳定的。声纳系统通常使用发射和接收单元阵列,而不是单一信道。通过在单元阵列中合理控制和混合信号,声纳系统能够控制脉冲发射的方向,并且确定回声返回的方向。为了处理这种多元阵列信道,声纳系统需要和雷达系统一样庞大的 DSP 计算能力。

(3)地震波。地震波信号产生于地震、火山喷发或地下爆炸导致的岩石移动所产生的波。地壳的移动产生由移动源向各个方向传播的三种基本弹性波,其中两种(速率不同的)波可以通过地壳传播,速度相对较快的波称为纵波或 P-wave,而速度稍慢的波称为横波或 S-wave。第三种波称为表面波,它沿地表传播。早在 20 世纪 20 年代,地球物理学家就发现能够用声波研究地壳结构。他们在地表呈线状间隔排列由高爆物组成的震源,爆炸产生的地震波通过信号的处理,包括时间/幅度的补偿,可以根据地震反射波的时间差绘制地表以下超过 10km 的地质构造图。这种人工地震波探测方法目前已成为勘测石油、矿藏和历史遗迹的主要方法。同时,还可以由此判断出地震或者核爆炸的量级以及震源或核爆炸中心的位置。

3. 图像处理

图像是具有特殊特征的信号。首先,它是空间(距离)参数的变量,而大多数信号是时间参数的变量。第二,它包含大量的信息,例如,1s 的电视视频图像需要超过 10MB 的空间去存储,比同等长度的语音信号要大 1000 倍。第三,对图像质量的最终评判是由人的主观而不是由某种客观标准决定的。这些特点使得图像处理成为数字信号处理中的一个特殊分

支。图像处理中的基本问题是图像的表示和建模，图像增强，图像复原以及图像的重建、分析和编码等。

(1) 医学影像。1895 年，Wilhelm Conrad Röntgen 发现 X 射线能够穿透许多坚硬的物质，从而导致了医学的革命性变化。医用 X 射线系统在随后的几年间得到了世界范围的普及。尽管医用 X 射线影像拯救了无数人的生命，但它还是受到四个方面难题的制约，直至 20 世纪 70 年代 DSP 及相关技术的出现为止。首先，人体的组织器官可能重叠在其他组织的下面，例如，肋骨后面的心脏的某些部位就无法看到。第二，相似组织不易区分，例如，可以容易地分辨骨头和软组织，但很难区分肿瘤和其他脏器。第三，X 射线影像只能显示解剖结构，即身体的组织，却不能显示生理学指标，即身体的功能，比如活体的 X 射线影像和一个死人的 X 射线影像几乎是相同的。第四，经常暴露在 X 射线照射下是有危险的，这就要求只能保守地使用并且要有充分的理由。1971 年发明的计算机断层扫描技术 (CT) 使组织重叠问题得到了很好的解决，而 CT 是数字信号处理应用的一个经典范例。X 射线从多个方向穿过病人身体，与常规 X 射线拍摄照片不同的是，接收信号被转换成数据格式存储在计算机中。计算机随后调用大量数字信号处理算法对数据进行分析计算，最终得到比传统影像包含更多信息的身体切片图像。最后的三个问题通过使用非 X 射线，如射频电波和声波的穿透能量得到了解决。DSP 从中同样起到了关键的作用。例如，磁共振成像 (MRI) 利用磁场和射频电波研究人体的内部。适当地调整场的强度和频率，使得身体局部区域的原子核在量子能量状态产生共振。这一共振导致了二次电波的辐射，它被放置在身体附近的天线所接收。被检测到的信号的强度及其他特征提供了共振区域的精细信息。通过调整磁场（导致共振区位置改变），可以对全身进行扫描，从而得到比 CT 更为精细的身体内部影像。MRI 的实现完全依赖于数字信号处理技术，没有 DSP，就不可能有 MRI。

(2) 商业成像产品。图像系统所需处理的大量信息对要求面向大众的影像设备如数码相机、数码摄录机、DVD 和高清数字电视来说都是一个挑战。商用系统必须廉价，这就对大内存和高速数据转换器件的应用带来了限制。一种行之有效的解决方案就是采用图像压缩算法和技术。就像语音信号一样，图像中也包含着大量的冗余信息。对图像进行压缩处理能够极大地减轻传输、存储的负担，从而降低产品的成本。

(3) 图像建模。一幅特定图像的每一个像素都代表着对象的某一确定的物理量，像素的特征被称为图像描述。例如，一幅照片代表了从照相机中看到的对象的光亮度。卫星或飞机拍摄的红外图像描述了地表的温度轮廓。可以根据图像类型及其应用定义各种图像模型。这些模型的建立可能还取决于感觉以及局部和全局的特征。图像处理所采用算法的类型和性能取决于所采用的图像模型。

(4) 图像增强。图像增强算法通常从视觉角度强调特定的图像特征以便改善图像的质量，或者从特征提取角度辅助分析图像。所用的算法包括边缘检测、对比度增减、锐化、线性和非线性滤波、图像缩放以及噪声滤除等。

(5) 图像恢复。图像恢复技术用于消除或减少图像的污损，例如由系统引入的几何失真和模糊。图像重构涉及根据从不同角度获得的若干平面投影来推断一个三维物体的二维图像切片。通过建立连续的图像切片，就可以逐步展现一个给出其内部视图的三维图像。

一幅图像的数字化处理需要进行采样和量化。通常一幅中等大小的数字图像以其原来的格式进行存储往往需要占据较大的存储空间。图像编码或压缩技术与语音编码技术相同，它

可以在不降低图像（视觉）质量的情况下减小图像存储所占用的空间。

4. 柴油发动机信号

DSP 技术对提高柴油发动机的工作效率及降低污染具有重要的作用。发动机的高效运转需要准确测定发动机气缸内活塞行程的最高点。通常在柴油发动机燃烧室内火花塞位置放置一个双探针，探针由一个微波天线和一个光敏二极管组成。微波探针捕获（发动机运转时）由于活塞上下运动而引起变化的气缸空腔反射的电磁波。该信号的波形沿顶端中心对称，且与发动机的转速、温度、气缸压力或空气-燃料比无关。这个对称点通常通过一台微型计算机进行计算，燃料注入泵的位置同样通过计算机进行调整，其精度则由光敏二极管检测到的发光强度来确定，可以控制在 0.5 cd。

本章小结

本章介绍了数字信号处理的基本概念和基本分析方法以及处理过程，说明了数字信号处理的特点与重要性，最后给出了一些应用实例。

习 题

- 1-1 什么是数字信号，它是怎样表示或描述的，有什么特点。
- 1-2 什么是数字信号处理，数字信号处理的方法有哪些，各有什么优、缺点。
- 1-3 简述生活中所接触到数字处理的实例，并说出它的处理过程。
- 1-4 数字信号处理的优点有哪些。
- 1-5 画出数字信号处理系统的简单流程图。