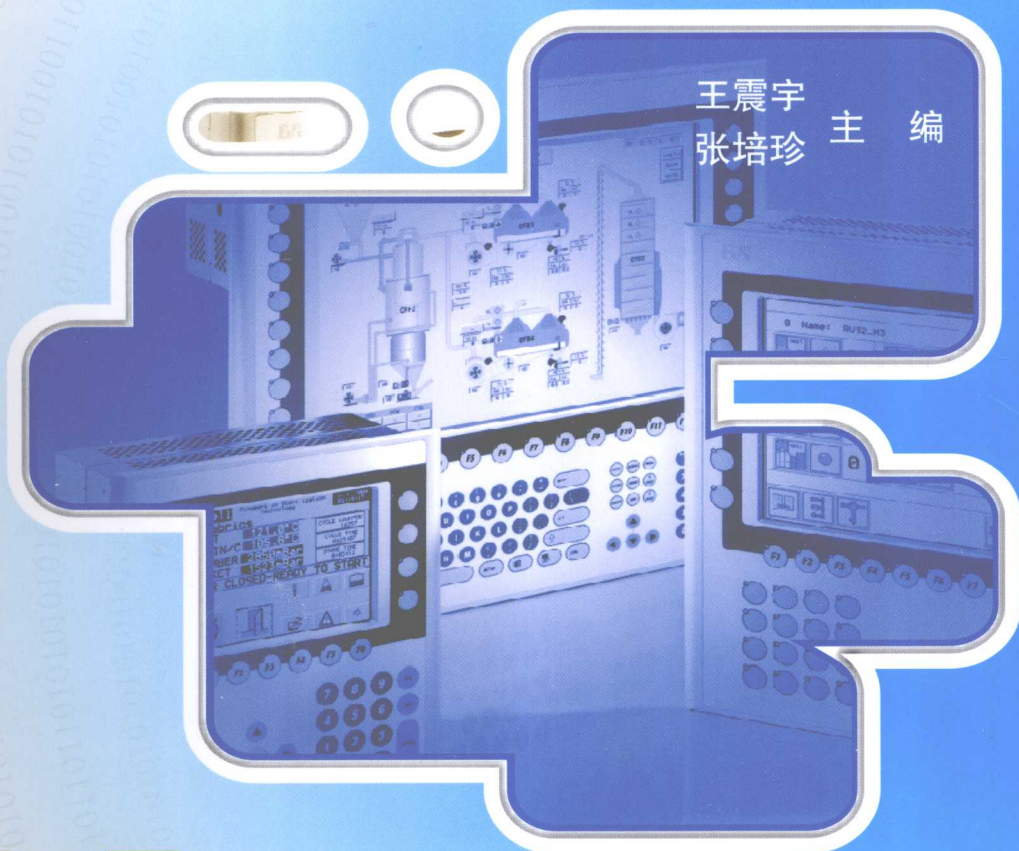




21世纪全国本科院校电气信息类**创新型**应用人才培养规划教材

数字信号处理

王震宇 主 编
张培珍



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材

数字信号处理

主 编 王震宇 张培珍
副主编 李灿革 孙国玺 赵桂艳
李 颖 杜彦蕊



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书系统地讲述了数字信号处理的基本概念、基本理论、基本算法和分析方法。本书共分 11 章, 内容涵盖了信号处理的基础知识、离散时间信号与系统、 z 变换、离散傅里叶变换、多种快速傅里叶变换算法以及数字滤波器的结构、理论和设计方法。配合正文, 在适当的章节引入 MATLAB 进行分析和仿真, 每章都有理论应用于实践的介绍、丰富的例题和习题。

本书适用于普通高等院校电气、电子、通信、自控等强、弱电类专业本科教学使用, 也可供相关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理/王震宇, 张培珍主编. —北京: 北京大学出版社, 2010. 2

(21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-16076-3

I. 数… II. ①王…②张… III. 数字信号—信号处理—高等学校—教材 IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 197549 号

书 名: 数字信号处理

著作责任者: 王震宇 张培珍 主编

责任编辑: 刘 丽

标准书号: ISBN 978-7-301-16076-3/TN·0054

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电 子 邮 箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 北京宏伟双华印刷有限公司

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 20 印张 462 千字

2010 年 2 月第 1 版 2010 年 2 月第 1 次印刷

定 价: 32.00 元

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

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前言

数字信号处理是普通高等院校电气信息类及相关专业开设的重要的专业技术课程之一。虽然其基本理论已非常成熟,但随着近代信号处理理论不断发展、为其辅助的计算和仿真工具不断更新以及当今新的学科领域和分支的相继涌现,相关专业的知识结构和相应的学时产生了变化。因此,有必要调整传统的教材内容,以适应新的教学大纲和教学要求。

本书内容尽力兼顾强、弱电专业,力图紧密联系信息技术,并体现信息学科的特色。本书包括3部分,共11章内容,第一部分包括第1~4章,阐述数字信号处理的基础理论;第二部分由第5~9章组成,重点讲述数字滤波器的基本理论和设计方法,是数字信号处理研究的重要内容;第三部分包括第10、11章,包括上机实验和理论应用,目的是应用MATLAB掌握信号处理的复杂算法,有利于读者进一步加深对理论的理解。

本书以掌握数字信号处理的基本算法为宗旨。在正文部分全面讲述数字信号处理知识,并根据需要适当地引入MATLAB进行仿真。同时,本书还强调将所学理论应用于实践,在大部分章节后面都有“综合实例”,以便读者了解实际应用中的数字信号处理理论,虽不能以偏概全,但希望可以激发读者对数字信号处理理论应用的兴趣,以便能在今后设计出更有实用价值的算法。另外,根据不同专业的要求,教学内容和教学学时也是不同的,本书带有“*”标识的章节,在讲授和学习过程中可以视情况进行取舍。本书电子课件、全部仿真程序和习题参考答案可从 www.pup6.com 网站上下载。

学习本书要求具备必要的数学基础和信号系统知识。但为了避免和信号与系统课程的内容大量重复,本书在内容的取舍方面结合数字信号处理技术的发展进行了精心安排,保证了课程的完整性和可扩展性,扩大了应用专业的范围。

本书经过集体讨论,分工执笔。王震宇编写第1、5、6章,张培珍编写第7、8章,李灿苹编写第4、9章,赵桂艳编写第10章,李颖编写第11章,孙国玺、张涛、张静和杜彦蕊共同编写第2、3章,王震宇和张培珍担任主编,并负责本书的修改、统稿和定稿工作。本书的习题参考答案由张培珍制作。

本书建议教学参考学时为48~56学时,具体安排如下。

第1章 绪论为1学时,第2章 离散时间信号与离散时间系统为1~3学时,第3章 z 变换及离散系统的频域分析为2~4学时,第4章 离散傅里叶变换及其快速算法为6学时,第5章 模拟滤波器的设计为2~4学时,第6章 IIR数字滤波器的设计为6~8学时,第7章 FIR数字滤波器的设计为6学时,第8章 数字滤波系统的网络结构与分析为8学时,第9章 数字信号处理中的有限字长效应为4学时,第10章 数字信号处理的应用为2学时,第11章 上机与实验为10学时。教师可根据具体情况适当调整学时。

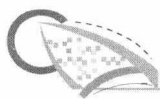
在本书出版之际,对众多同事、同行以及参考文献中的作者,谨表谢忱,普铭高谊。限于编者水平,书中不当之处在所难免,诚望读者和专家指正。

编 者

2010年1月

目 录

第 1 章 绪论	1	3.4 z 变换与拉普拉斯变换和 傅里叶变换的关系	47
1.1 数字信号处理的发展历史	2	3.4.1 z 变换与拉普拉斯 变换的关系	47
1.2 数字信号处理系统的基本组成	4	3.4.2 z 变换与傅里叶变换的关系	48
1.3 数字信号处理的简要特点	4	3.5 序列的傅里叶变换及性质	48
1.4 数字信号处理的应用领域	5	3.5.1 序列的傅里叶变换	48
1.5 数字信号处理与 MATLAB 的关系	6	3.5.2 序列傅里叶变换的性质	49
小结	6	3.5.3 序列傅里叶变换的对称性	51
习题	7	3.6 离散系统的频域分析	54
第 2 章 离散时间信号与离散时间系统	8	3.6.1 系统函数	54
2.1 离散时间信号	10	3.6.2 系统函数和差分方程	54
2.1.1 离散时间信号的数学表示	10	3.6.3 因果稳定系统	55
2.1.2 典型的离散时间信号 ——序列	10	3.6.4 系统频率响应的几何 确定法	56
2.2 离散时间信号的运算	14	3.7 综合实例	58
2.3 离散时间系统	16	小结	60
2.3.1 离散时间系统的线性	16	习题	60
2.3.2 离散时间系统的时不变性	17	第 4 章 离散傅里叶变换及其快速算法	64
2.3.3 离散时间系统的因果性 和稳定性	17	4.1 傅里叶变换的几种形式	66
2.4 离散时间系统分析——差分方程	18	4.1.1 连续非周期时间信号的 傅里叶变换	66
2.4.1 离散时间系统的描述	18	4.1.2 连续周期时间信号的 傅里叶变换	67
2.4.2 常系数线性差分方程的 求解方法	19	4.1.3 离散非周期时间信号的 傅里叶变换	67
2.5 综合实例	22	4.1.4 离散周期时间信号的 傅里叶变换	68
小结	26	4.2 周期序列的离散傅里叶级数	69
习题	26	4.2.1 离散傅里叶级数的导出	69
第 3 章 z 变换及离散系统的频域分析	29	4.2.2 离散傅里叶级数的性质	72
3.1 z 变换	31	4.3 离散傅里叶变换	76
3.1.1 z 变换的定义	31	4.4 离散傅里叶变换的性质	79
3.1.2 z 变换的收敛域	31	4.4.1 线性	79
3.2 z 反变换	36	4.4.2 循环移位	80
3.2.1 留数法	36	4.4.3 循环卷积	82
3.2.2 幂级数法	39		
3.2.3 部分分式法	40		
3.3 z 变换的性质和定理	42		



4.4.4 线性卷积与循环卷积之间的关系	85	6.3 设计 IIR 数字滤波器的 频率变换法	169
4.4.5 共轭对称性	87	6.3.1 低通变换	170
4.4.6 DFT 与 z 变换的关系	89	6.3.2 高通变换	175
4.4.7 DFT 形式下的 帕斯瓦尔定理	89	6.3.3 带通变换	179
4.5 利用 DFT 对连续信号进行谱分析 ..	90	6.3.4 带阻变换	183
4.6 快速傅里叶变换	91	6.4 综合实例	186
4.6.1 直接计算 DFT 的运算量 ..	91	小结	189
4.6.2 改进途径	92	习题	190
4.6.3 按时间抽取的基-2FFT 算法	92	第 7 章 FIR 数字滤波器的设计	192
4.6.4 按频率抽取的基-2FFT 算法	99	7.1 FIR 数字滤波器的线性相位特性 ..	194
4.6.5* N 为组合数的 FFT 和 基-4FFT	102	7.1.1 线性相位的定义	194
4.6.6* Chirp- z 变换	107	7.1.2 线性相位的条件	194
4.7 FFT 的应用	112	7.2 幅度特性	197
4.7.1 用 FFT 计算 IDFT	112	7.2.1 $h(n)$ 偶对称, N 为奇数 ..	197
4.7.2 实数序列的 FFT	112	7.2.2 $h(n)$ 偶对称, N 为偶数 ..	199
4.7.3 线性卷积的 FFT 算法	113	7.2.3 $h(n)$ 奇对称, N 为奇数 ..	201
4.7.4 用 FFT 计算相关函数	118	7.2.4 $h(n)$ 奇对称, N 为偶数 ..	202
4.8 综合实例	120	7.3 零点特性	204
小结	123	7.3.1 零点的对称性	204
习题	123	7.3.2 零点对称的 4 种情况	205
第 5 章 模拟滤波器的设计	126	7.4 窗口函数法设计 FIR 数字滤波器 ..	207
5.1 模拟滤波器的逼近	129	7.4.1 窗函数法设计 FIR 数字 滤波器的基本思想	207
5.2 巴特沃斯滤波器	131	7.4.2 常用的窗函数	212
5.3 切比雪夫滤波器	137	7.5 频率采样法	218
5.4 椭圆滤波器	141	7.5.1 频率采样法的基本原理 ..	219
5.5 综合实例	143	7.5.2 用频率采样法设计线性 相位滤波器的约束条件 ..	220
小结	146	7.6 IIR 和 FIR 数字滤波器的性能 综合比较	221
习题	146	7.7 综合实例	222
第 6 章 IIR 数字滤波器的设计	148	小结	226
6.1 根据模拟滤波器设计 IIR 数字 滤波器	152	习题	226
6.1.1 脉冲响应不变法	152	第 8 章 数字滤波系统的网络结构与 分析	228
6.1.2 双线性变换法	158	8.1 数字滤波器的结构表示	230
6.2 IIR 数字滤波器的最优化设计法 ..	168	8.2 FIR 数字滤波器的网络结构形式 ..	231
		8.2.1 直接型	231
		8.2.2 级联型	232
		8.2.3 线性相位型	234





8.2.4 频率采样型	236	10.1.1 语音信号的数字化	277
8.3 IIR 数字滤波器的结构	241	10.1.2 数字化语音信号的存储 及加窗	278
8.3.1 IIR 数字滤波器的特点	241	10.1.3 语音信号数字处理中的 短时分析技术	278
8.3.2 直接 I 型	241	10.1.4 语音合成	279
8.3.3 直接 II 型	242	10.1.5 语音识别	279
8.3.4 级联型	243	10.2 数字图像处理	280
8.3.5 并联型	245	10.2.1 数字图像处理基础	280
8.4* 数字滤波器的格型结构	247	10.2.2 图像增强	281
8.4.1 全零点滤波器的格型 结构	247	10.3 综合实例	286
8.4.2 全极点滤波器的格型 结构	248	小结	289
8.4.3 零极点滤波器的格型 结构	249	习题	289
8.5 综合实例	250	第 11 章 上机与实验	290
小结	252	11.1 MATLAB 基本操作	290
习题	252	11.1.1 实验目的	290
第 9 章 数字信号处理中的 有限字长效应	255	11.1.2 实验原理	290
9.1* 二进制的表示及其对量化的 影响	257	11.1.3 实验内容	291
9.1.1 定点二进制数	257	11.1.4 实验分析	292
9.1.2 浮点二进制数	258	11.1.5 实验总结	292
9.1.3 定点制的量化误差	259	11.2 典型离散信号及其 MATLAB 实现	292
9.2 A/D 转换的量化效应	261	11.2.1 实验目的	292
9.2.1 量化效应的统计分析	261	11.2.2 实验原理	292
9.2.2 量化信噪比与所需字长的 关系	263	11.2.3 实验内容	293
9.2.3 量化噪声通过线性系统	263	11.2.4 实验分析	294
9.3 数字滤波器的系数量化效应	265	11.2.5 实验总结	294
9.4 数字滤波器运算中的有限字长 效应	265	11.3 离散时间信号和离散时间系统	294
9.4.1 IIR 数字滤波器的有限 字长效应	266	11.3.1 实验目的	294
9.4.2 FIR 数字滤波器的有限 字长效应	269	11.3.2 实验原理	294
9.5 FFT 算法的有限字长效应	270	11.3.3 实验内容	295
小结	274	11.3.4 实验分析	297
习题	274	11.3.5 实验总结	297
第 10 章 数字信号处理的应用	276	11.4 离散时间信号的频域分析	297
10.1 数字语音信号处理	277	11.4.1 实验目的	297
		11.4.2 实验原理	297
		11.4.3 实验内容	298
		11.4.4 实验分析	300
		11.4.5 实验总结	300
		11.5 离散傅里叶变换及其快速算法	300
		11.5.1 实验目的	300
		11.5.2 实验原理	300





11.5.3	实验内容	300	11.7	FIR 数字滤波器的设计	304
11.5.4	实验分析	302	11.7.1	实验目的	304
11.5.5	实验总结	302	11.7.2	实验原理	304
11.6	IIR 数字滤波器的设计	302	11.7.3	设计指标	305
11.6.1	实验目的	302	11.7.4	实验要求	305
11.6.2	实验原理	303	11.7.5	调试及结果测试	306
11.6.3	实验内容	303	11.7.6	实验报告要求	306
11.6.4	实验分析	304	11.7.7	思考题	306
11.6.5	实验总结	304	参考文献		307



第1章 绪论

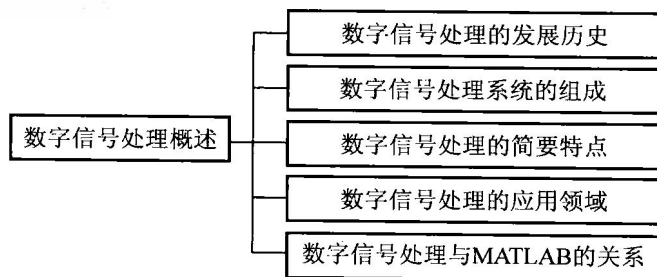


教学目标与要求

- (1) 了解数字信号处理的发展概况。
- (2) 了解数字信号处理的简要特点。
- (3) 了解数字信号处理的应用领域。
- (4) 理解数字信号处理系统的组成。



知识架构



导入实例

在1991年的海湾战争中，美军在信息化作战理论的研究方面积累了一定的经验，应用数字信号处理技术使其战术技术的运用更加灵活。美军很早就制订了“海湾地区国防通信计划”（DCS-CA），部署了十几颗侦察卫星，同时与多国部队依靠由23颗侦察卫星、130多架侦察和预警飞机、39个地面监听站和大量战场电视监视系统组成了战场认知系统，应用先进的遥感、遥测和图像处理技术建立了陆、海、空多层次的立体侦察监视体系，广泛收集阿拉伯国家的战略战役和战术情报，尤其是伊拉克的指挥、情报、通信、控制系统和重要的武器系统信息，使得伊拉克处于信息战的劣势地位。

据统计，海湾战争中精确制导武器的使用约占弹药消耗总量的8%，1995年北约空袭波黑塞族为60%，1998年“沙漠之狐”行动占70%，1999年科索沃战争为90%左右。这正是因为广泛应用了遥感、

遥测、高速信号处理、自动控制和推进理论等技术,并使其逐步向多功能、通用化、模块化、智能化和灵巧化方向发展,才使得集可靠性和易操作性的高技术武器装备^[1]得到了广泛应用。

在心电图、脑电图、脑诱发电位理论被广泛应用的今天,以脑电波测试为例,应用数字相机获取测试图像,然后对测试点电极信息进行计算机图像提取和分离处理,再采用数据查询对比与线性拟合近似实现三维重构,这一“无接触式图像处理”新方法,其80%的测试点都能满足精度要求,正是得益于“以软代硬”的传感智能化的有益尝试^[2]。这一新方法是针对生物医学中典型的数字信号测量与处理。

数字信号处理是利用计算机或专用处理设备,以数字形式对信号进行采集、变换、滤波、估值、增强、压缩、识别等处理的理论与技术,以得到符合需要的信号形式。数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)与模拟信号处理(Analog Signal Processing, ASP)是信号处理的子集。这一章将简述数字信号处理的发展历史、简要特点、应用领域以及数字信号处理系统的基本组成。

1.1 数字信号处理的发展历史

一般认为,16世纪发展起来的经典数值分析方法和18世纪拉普拉斯变换引申的 z 变换是数字信号处理的数学理论基础。直到1937年Mason与Sykes发表了阐述滤波器的论文,成为影像阻抗、影像相位和衰减函数的起源。1947年,Hurwicz发表了关于抽样数据控制系统的第一篇近代论文。

第二次世界大战后不久,数字元件被用于构成数字滤波器。但就成本、体积和可靠性来说,还远不如模拟滤波器和模拟谱分析。到了20世纪50年代,采样的概念及频谱效应已被充分了解, z 变换理论已普及到电子工程领域。1958年,Ragazzini等人编写的*Sampled-Data Control Systems*,是第一本有关数字信号处理的近代著作,由于受到当时工艺水平的限制,只能对一些低频控制或地震信号的数字处理问题做实践性的尝试。20世纪60年代中期,数字信号处理理论才较为定型。此时,集成电路工艺的不断提高,使得用数字元件构成较完善的信号处理系统是完全可能的。

1965年,Cooley和Tukey发表的快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)使数字信号处理从概念到实现迈出了重要一步,是数字信号处理的重大进展之一。在20世纪60年代初,虽然计算机被用来进行谱分析,但所需的时间太长,且应用还有许多困难。而快速傅里叶变换使计算时间缩短了两个数量级,运算时间大大降低,使数字信号处理技术得以成功应用。

20世纪60年代末至70年代初期又出现了一些新的快速算法。先后由Rader、Agarwal和Burrus等人提出了用数论变换进行卷积运算的方法,比FFT卷积运算速度更高,且由于是采用整数模运算,因而不存在运算误差。1975年后,Winograd等人又提出了比FFT更快的另一种算法——WFTA(Winograd Fourier Transform Algorithm)算法,该算法具有与FFT一样的物理意义。20世纪60年代,又根据沃尔什函数发展为沃尔什变换(WHF)及其快速算法(FWHT),并很快在通信和图像处理中得以应用。

数字信号处理发展过程中的另一个重大里程碑是有限冲激响应(FIR)和无限冲激响应(IIR)数字滤波器地位的相对变化。最初,IIR数字滤波器通常被认为比FIR数字滤波器优越。随着信息理论的发展,信号的相位被认识到与幅度一样也包含着信息。为了得到更多的信息,需要同时提取包含在幅度与相位中的信息,因此相位失真就应该在信号处理过



程中减少到最小。从性能上来说, IIR 数字滤波器传输函数的极点可位于单位圆内的任何地方, 因此可用较低的阶数获得高的选择性, 所用的存储单元少, 经济性好, 而且效率高。但是这个高效率是以相位的非线性为代价的, 因为选择性越好, 相位非线性越严重。FIR 数字滤波器却可以得到严格的线性相位, 然而由于 FIR 数字滤波器传输函数的极点固定在原点, 所以只能用较高的阶数达到高的选择性。对于同样的滤波器设计指标, FIR 数字滤波器所要求的阶数可以比 IIR 数字滤波器高 5~10 倍, 结果是成本较高, 信号延时也较大; 如果按相同的选择性和相同的线性要求来说, 则 IIR 数字滤波器就必须加全通网络进行相位校正, 同样要增加滤波器的节数和复杂性。从结构上来说, IIR 数字滤波器必须采用递归结构, 极点位置必须在单位圆内, 否则系统将不稳定。另外, 由于 IIR 数字滤波器运算过程中对序列的舍入处理, 这种有限字长效应有时会引入寄生振荡。而 FIR 数字滤波器主要采用非递归结构, 不论在理论上还是在实际的有限精度运算中都不存在稳定性问题, 运算误差也较小。此外, FIR 数字滤波器可以采用快速傅里叶变换算法, 在相同阶数的条件下, 运算速度可以快得多。后来一种应用快速傅里叶变换进行卷积运算的方法被提出, 就不再一概而论地认为 IIR 数字滤波器比 FIR 数字滤波器更优越了, 而是视应用场合加以选择, 这加速了对 FIR 数字滤波器的进一步研究。20 世纪 70 年代以来, 数字信号处理中的有限字长效应的分析与研究, 解释了数字信号处理中出现的许多现象, 使数字信号处理的基本理论进入了基本成熟的阶段。1975 年, Oppenheim 与 Schaffer 所著的《数字信号处理》一书是数字信号处理理论的代表作。

数字信号处理是一种软硬结合的技术。在其实现方面, 大规模集成电路技术的提高是推动数字信号处理技术飞速发展的重要因素。世界上第一个单片 DSP 芯片是 1978 年 AMI 公司推出的 S2811。1979 年, Intel 公司发布的商用可编程 2920 是 DSP 芯片的一个主要里程碑。1980 年, NEC 公司推出的 μ PD7720 是第一个具有乘法器的商用 DSP 芯片。1982 年, Hitachi 公司第一个采用 CMOS 工艺生产浮点 DSP 芯片。1983 年, Fujitsu 公司推出的 MB8764, 其指令周期为 120 ns, 且具有双内部总线, 从而处理的吞吐量发生了一个大的飞跃。第一个高性能的浮点 DSP 芯片是 AT&T 公司于 1984 年推出的 DSP32。

在运算速度方面, MAC(乘法并累加)时间已从 20 世纪 80 年代的 400 ns 降低到目前 40 ns 以下, 数据处理能力提高了几十倍。MIPS(每秒执行百万条指令)从 20 世纪 80 年代初的 5 MIPS 增加到现在的 40 MIPS 以上。DSP 芯片内部关键的乘法器部件从 1980 年占模区的 40 左右下降到 5 以下, 片内 RAM 增加一个数量级以上。

在制造工艺方面, 1980 年采用 4 μ m 的 N 沟道 MOS 工艺, 现在普遍采用亚微米 CMOS 工艺。DSP 芯片的引脚数量从 1980 年的最多 64 个增加到现在的 200 个以上, 从某种角度来说较多的引脚数, 将增强结构灵活性。此外, DSP 芯片的发展还使得 DSP 系统的成本、体积、重量和功耗都有很大程度的下降。

在其开发系统方面, 软硬件开发工具不断完善。目前某些芯片具有相应的集成开发环境, 不但支持断点的设置和程序存储器、数据存储器 and DMA 的访问及程序的单步运行和跟踪等, 还可以采用高级语言编程, 有些厂家和一些软件开发商为 DSP 应用软件的开发准备了通用的函数库及各种算法子程序和各種接口程序, 使得应用软件开发更为方便, 开发时间大大缩短, 提高了产品开发的效率。

1.2 数字信号处理系统的基本组成

数字信号处理系统的基本组成框图及各部分处理波形图如图 1.1 所示。

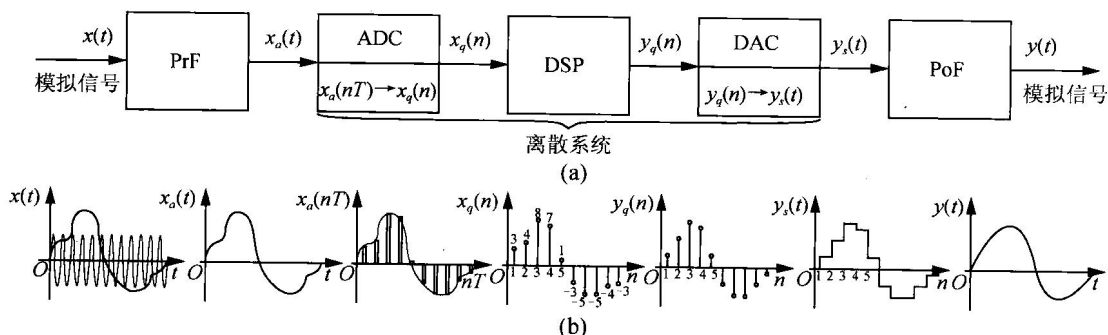


图 1.1 数字信号处理系统的基本组成与各部分处理波形示意图

(a) 数字信号处理系统的基本组成示意图；(b) 数字信号处理系统的各部分处理波形示意图

PrF 是低通滤波器，也可以称为前置滤波器或抗混叠滤波器，它用于滤掉截止频率以上的信号，以免在采样过程中引起混叠。

ADC 是一个模拟—数字转换器，用来从模拟信号产生一串二进制数值流。

DSP 是核心部分，可以代表一台通用计算机，或一种专用处理器，或数字信号处理硬件等。

DAC 称为数字—模拟转换器，就是 ADC 的逆操作，它从一串二进制数的序列中产生一种阶梯形波形，这是产生一个模拟信号的第一步。

PoF 是一个后置滤波器，用于将阶梯波形平滑为所期望的模拟信号。

模拟信号进行数字化处理的过程简而言之，就是首先把模拟信号变换为数字信号，然后用数字技术进行处理，最后再还原成模拟信号。输入模拟信号 $x(t)$ ，首先经过 PrF，将 $x(t)$ 中高于某一频率的分量滤除后，形成准备处理的模拟信号 $x_a(t)$ 。然后在 ADC 中每 T 秒取一次 $x_a(t)$ 的幅度(称为采样)，采样后的信号称为离散时间信号 $x_a(nT)$ ，它表示一些离散时间点 $0, T, 2T, 3T, \dots, nT$ 上的信号值 $x_a(0), x_a(T), x_a(2T), x_a(3T), \dots, x_a(nT)$ 。随后在 ADC 的抽样保持电路中转换为数字信号 $x_q(n)$ ，这一过程一般称为量化。为形象起见，用一条顶端带有圆圈的垂直线段表示 $x_q(n)$ 的数值大小。在通过数字信号处理系统的核心部分 DSP 时，按照指令的要求进行数值处理，得到输出数字信号 $y_q(n)$ 。之后经过 DAC，将 $y_q(n)$ 变换成模拟信号 $y_s(t)$ ，其特点是在时间点 $0, T, 2T, 3T, \dots, nT$ 上的幅度与 $y_q(n)$ 的数值是吻合的。最后经过 PoF，形成平滑的模拟输出信号 $y(t)$ 。

1.3 数字信号处理的简要特点

模拟信号处理在完成复杂信号处理应用中的有限能力是其重要缺陷，这决定了在处理中的非柔性与系统设计中的复杂性，也必将导致产品价格的不菲。然而利用数字信号处



理,完全可以将一台廉价的 PC 转换为一台功能强大的信号处理装置。接下来简要描述一下数字信号处理及由数字信号处理构成系统的大致优点。

(1) 接口通用。采用数字信号处理技术的系统与其他以现代数字技术为基础的系统或设备,包括 PC 都是相互兼容的,通过通用接口以实现某种功能要比 ASP 要容易得多。

(2) 编程方便。采用数字信号处理技术的系统,其中的可编程 DSP 芯片可使设计人员在开发过程中灵活方便地对软件进行修改和升级,可以用运行在一台通用计算机上的软件来完成,便于建立和测试,并且软件可以方便携带。

(3) 集成快速。采用数字信号处理技术的系统中,大部分采用数字部件,具有较高的规范性,便于大规模集成。

(4) 调试快捷。数字信号处理所用的运算较易进行实时修改,可通过简单地修改程序,或修改寄存器中的内容就可实现,便于测试、调整 and 大规模生产。

(5) 运行稳定。数字信号处理所用的运算是唯一建立在加法和乘法基础之上的,具有极为稳定的处理能力,可靠性高。

(6) 精度高。一般来说,模拟系统的精度在 10^{-3} 以内,而目前流行的 16 位数字系统可以达到 10^{-6} 的精度。

(7) 成本低。采用数字信号处理技术的系统一般均应用 VLSI 技术,因而会降低存储器、门电路以及微处理器等的成本,从而使得整个系统具有较低的成本。

当然,数字信号处理技术以及由数字信号处理技术构成的系统也有一些局限性,例如数字信号处理会增加系统的复杂性,因 ADC 采样频率的限制而使其应用的频率范围受到限制,另外由数字信号处理技术构成的系统集成了几十万甚至更多的晶体管而使功耗较大,而且随着系统复杂性的增加这一矛盾会更加突出。然而瑕不掩瑜,数字信号处理技术以及由数字信号处理构成的系统所具有的灵活、精确、抗干扰强、设备尺寸小、造价低、速度快等突出优点,都是模拟信号处理技术与设备所无法比拟的。

1.4 数字信号处理的应用领域

数字信号处理的应用已经涵盖了工业、通信、娱乐、个人医疗、教育、环境控制、安全等领域,下面,仅从技术角度进行简要的描述。

(1) 滤波与变换。如数字滤波、自适应滤波、快速傅里叶变换、频谱分析、卷积等。

(2) 通信与传输。如调制与解调、自适应均衡、数据压缩、回波对消、多路复用、扩频通信、纠错编码、TDMA 等通信模式等。

(3) 语音与语言。如语音编码、语音合成、语音识别、语音增强、说话人辨认、说话人确认、语音邮件、语音储存、文本语音变换等。

(4) 图像与图形。如二维和三维图形处理、图像压缩、图像增强、图像复原、图像重建、图像变换、图像分割与描绘、模式识别、计算机视觉、固态处理、电子地图、电子出版、动画等。

(5) 家用电器。如数字音频、数字视频、音乐合成、音调控制、玩具与游戏、远程电视电话等。



- (6) 仪器仪表。如频谱分析、信号产生、锁相技术、模式匹配、地震波处理等。
- (7) 自动控制。如机器人控制、探空技术、自动驾驶、磁盘控制、CAM 等。
- (8) 医疗器械。如 CT 扫描、核磁共振、辅助视听、超声设备、诊断工具、病人监护等。
- (9) 军事国防。如加密与解密、雷达处理、声呐处理、导航、侦察卫星、航空航天测试、自适应波束形成、阵列天线信号处理等。

综上所述, 数字信号处理正以前所未有的速度渗透到世界的每个角落中去。

1.5 数字信号处理与 MATLAB 的关系

MATLAB 是英文单词 “Matrix” 和 “Laboratory” 的融合, 意为 “矩阵实验室”。经过十几年的完善和扩充, 现已发展成为不需定义数组的维数, 就可以给出矩阵函数、特殊矩阵专门的库函数, 使之在求解诸如信号处理、建模、系统识别、控制、优化等领域的问题时, 显得大为简捷、高效、方便、快速, 这是其他高级语言所不能比拟的。特别是在集成了工具箱 (Toolbox) 之后, 可以轻而易举地求解包括信号处理、图像处理、控制系统辨识、神经网络等各类学科的问题。更加令人振奋的是还包含了图形界面 GUI, 使得工程人员能够进行可视化的程序编辑以及获得所需的可视化的结果。

由于 MATLAB 资源在所有的计算平台上都是可以利用的, 因此本书除了在讲解数字信号处理理论的同时, 也将 MATLAB 与数字信号处理的传统论题结合在一起, 应用 MATLAB 来阐明论点、解释难点。在数字信号处理方面有效地使用 MATLAB 可以获得更多的裨益, 并增进学习过程。

小 结

数字信号处理是利用计算机或专用处理设备, 以数字形式对信号进行采集、变换、滤波、估值、增强、压缩、识别等处理的理论与技术, 以得到符合需要的信号形式。数字信号处理与模拟信号处理是信号处理的子集。

一般认为, 数字信号处理起源于 16 世纪的经典数值分析方法和 18 世纪的 z 变换, 成型于 20 世纪 60 年代末和 70 年代初。由于数字信号处理以及由数字信号处理构成的系统因其接口通用、编程方便、集成快速、调试快捷、运行稳定、精度高和成本低, 使其具有灵活、精确、抗干扰强、设备尺寸小、造价低、速度快等突出优点, 其应用已经涵盖了工业、通信、娱乐、个人医疗、教育、环境控制、安全等领域, 并正以前所未有的速度渗透到世界的每个角落中去。

数字信号处理系统是由低通滤波器、模拟—数字转换器、DSP 核心、数字—模拟转换器和后置滤波器组成的, 每个模块的输出都各有特色。

MATLAB 是一个很好的数学软件, 本书将 MATLAB 与数字信号处理的传统论题结合在一起, 应用 MATLAB 来阐明论点、解释难点。在数字信号处理方面有效地使用 MATLAB 可以获得更多的裨益, 并增进学习过程。



习 题

1. 数字信号处理的含义是什么?
2. 简述数字信号处理的发展概况。
3. 简述数字信号处理的简要特点。
4. 简述数字信号处理的应用领域。
5. 简述数字信号处理系统的基本组成及各部分的主要功能。
6. 在数字信号处理系统中,一般包含 5 个主要部分。简单叙述一下自然信号经过这 5 个主要部分处理后的信号特点。
7. MATLAB 是一种什么软件? 简述其与数字信号处理的关系。

第2章

离散时间信号与离散时间系统

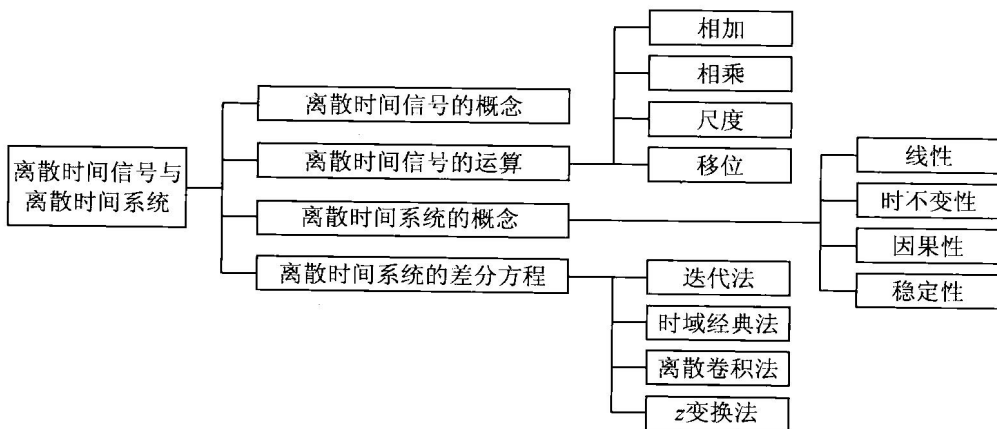


教学目标与要求

- (1) 掌握离散时间信号的定义、分类及其运算方法。
- (2) 掌握离散时间系统的特性，理解离散时间系统的输入输出描述。
- (3) 掌握离散时间系统差分方程的经典解法。



知识架构



导入实例

数字计算机、数字通信系统及数字控制系统均是典型的离散系统。随着计算机技术和数字技术的飞速发展以及广泛应用，对离散时间系统的分析与研究，成为系统分析的重要内容。

离散时间系统的最基本要素有实体、活动和事件。实体是指系统的活动对象,如飞机、货物配送车辆、乘客、商品、机器设备、产品原料、排队服务系统中的乘客、配送途中的商品等。活动是指实体所做的或对实体施加的行为,如乘客进入或离开交通工具的行为,从配送火车中取出商品的行为等。事件则是指引起系统状态发生变化的时刻,活动与事件之间的关系可表达为某种活动周期,即某种活动的成立需要包含活动开始的时间和活动结束的时间,即两种事件发生的间隔时间。

根据离散事件系统的特点,最根本的是建立系统模型,即描述系统中的某个实体、活动的时间之间的逻辑关系。如装备作战仿真系统是一个复杂的交互型混合动态系统,它描述的是一种基于离散时间的系统仿真技术,即通过确定离散系统仿真的基本要素,如随机离散事件、仿真时钟及其推进方式、未来时间表、随机数发生器等,并增加对连续系统的技术,实现装备作战仿真中连续及离散随机事件的仿真。据解放军报报道,南海舰队某护卫舰大队官兵在驾驭新型战舰的过程中,经历了许多挫折,最终明白了一个道理:打赢未来信息化战争,仅有先进的武器装备是不够的。只有改变传统训练模式,创新训法、战法,实现人与装备的有机结合,才能使战斗力得以快速提高,如图 2.1 和图 2.2 所示。



图 2.1 南海舰队某护卫舰大队

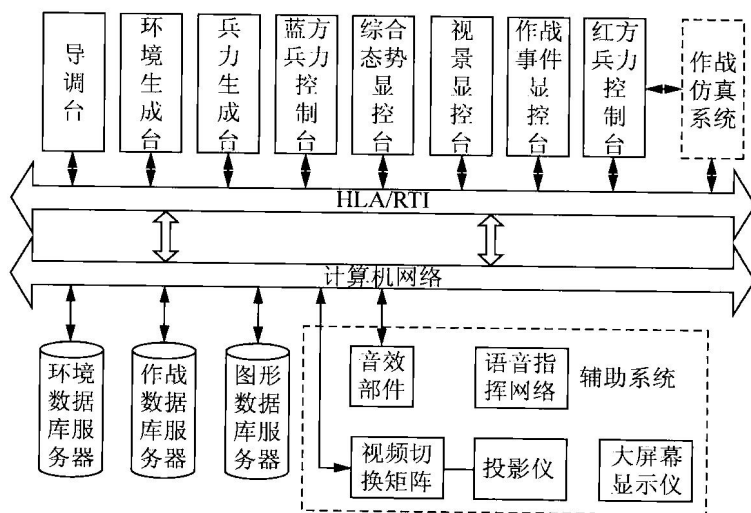


图 2.2 海上战场综合环境仿真系统结构

有关离散时间信号和离散时间系统的基本理论和基本概念是全书的基础,信号是指携带消息的载体,通常是一维或多维函数。如果信号的自变量和函数值都是连续的,称为时域连续信号,常见的如语音信号、温度传感器信号等;如果信号的函数值连续,但是自变