

赵健 王宾 马苗 编著

数字信号处理

(第2版)

清华大学出版社

赵健 王宾 马苗 编著

数字信号处理

(第2版)

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书系统地介绍了数字信号处理的基本理论和算法,并简单介绍了高速数字信号处理器。本书主要内容包括离散时间信号和离散时间系统、离散傅里叶变换和系统频率响应、Z 变换及系统函数、系统的网络结构、有限长序列的离散傅里叶变换、快速傅里叶变换(FFT)算法、数字滤波器设计和数字信号处理的应用。

本书的重点放在基本理论和基本概念上,强调对基本理论中的物理概念的透彻理解。同时尽量反映数字信号处理的最新发展;每章后附本章要点,有利于读者抓住重点。精选的习题便于读者检验所学内容。

本书可作为大学本科院校电子、通信和计算机等相关专业教材和参考书,也可作为工程技术人员的自学参考书。

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/赵健,王宾,马苗编著.--2 版.--北京:清华大学出版社,2011.11

ISBN 978-7-302-27721-7

I. ①数… II. ①赵… ②王… ③马… III. ①数字信号处理 IV. ①TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 268222 号

责任编辑:邹开颜

责任校对:赵丽敏

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

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

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:16 字 数:387 千字

版 次:2011 年 11 月第 2 版 印 次:2011 年 11 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:29.00 元

产品编号:038898-01

FOREWORD

前

言

本书第1版自2006年出版以来,已经印刷一万多册,被二十余所大学选为教材,以本书第1版为主体的教学成果“通过教材建设推进教学改革——以信号处理系列教材建设为例”获得西北大学2011年教学成果二等奖。通过大量的教学实践,许多老师和同学对本教材提出了很多宝贵的建议和意见。本着与时俱进的原则,作者完成了第2版的编写。第2版与第1版相比,更加注重基本概念的阐述和应用实现的介绍。数字信号处理应用与实现的介绍是为了提高学生的学习兴趣,让同学们知道这门课程的重要性和广泛的应用前景,而基本概念的重点阐述是为了让同学们把基础打好,为以后其他相关课程的学习有充分的知识储备。

作为一部“通用高等教育教材”,本书是作者在多年从事数字信号处理的教学和研究过程中编写而成。本书的内容就深度和广度而言,适合于高年级电子信息、通信、计算机、自动控制等专业本科生的学期48~60学时的课程教学。本书假定读者已经具备了连续时间信号与系统的基础知识,不要求读者预先掌握离散傅里叶变换等内容。

全书共6章,第1章首先介绍数字信号处理的基本概念,数字信号处理的应用,数字信号处理的研究内容。接着第2章全面叙述数字信号处理的一些具体概念及定义,包括离散时间序列的定义,离散卷积的计算,系统的稳定性和因果性,离散时间信号和系统的频域表示,连续时间信号的采样, Z 变换,系统函数,系统的信号流图,无限冲激响应(IIR)系统的网络结构和有限冲激响应(FIR)系统的网络结构等。

第3章和第4章是有关离散傅里叶变换(DFT)和快速傅里叶变换(FFT)的介绍,根据作者的体会,这两章内容是学习数字信号处理中的一个难点。作者在叙述时重点放在对基本原理的概念理解,并通过数学公式和图形相结合的方法,从定性和定量两方面清晰地表述DFT物理概念,有利于读者掌握DFT这一重点内容。FFT的内容重点放在FFT算法的基本原理和思路上,除了经典的基2-FFT算法外,本书还介绍了应用广泛的基4-FFT算法和实序列FFT算法。

第5章是关于数字滤波器设计的介绍。首先介绍了数字滤波器及滤波器技术指标,特别强调了数字滤波器指标的物理含义,IIR数字滤波器设计中先

介绍了巴特沃什和切比雪夫两种模拟滤波器设计,然后介绍了应用比较广泛的冲激响应不变法和双线性映射法。FIR 滤波器中特别突出了线性相位特性,并归纳四种对称情况下 FIR 滤波器的线性相位及滤波器的特点。设计方法上以窗函数法为重点,同时也介绍频率取样设计法,最后对两种滤波器从多方面进行了比较。

第 6 章介绍了最新的数字信号处理的应用,并且进一步介绍了数字信号的硬件实现方法。本章内容在上课时,教师可根据具体情况选讲,因为有一些应用与实现涉及同学们还没有学习的知识。我们建议本章可以在这门课程开始的时候结合绪论讲,让学习课程的同学知道这门课程的重要性和实用性,了解这门课程不是一门纯理论课程,而是一门应用于现代信息处理技术各个方面的理论与实践相结合的专业基础课。希望通过本章的学习,让同学们对数字信号处理这门课程有兴趣且愿去学。

本书内容侧重于基本理论和算法,同时列出专门章节讨论数字信号处理的应用。由于篇幅有限,本书略去了有限字长效应的内容,有兴趣的同学可以在有关的参考文献中找到。

本书的特点:

- (1) 对基本理论和算法进行充分讨论,强调基本原理和基本概念。
- (2) 突出基本理论中所包含的物理概念,使同学透彻理解。
- (3) 精选的习题内容丰富,有助于同学牢固掌握基础理论并达到学以致用目的。
- (4) 在理论论述、习题讲解等各个方面尽力理论联系实际,介绍数字信号处理的基本理论的时候就让读者对其工程应用有所了解。
- (5) 反映数字信号处理应用方面的新内容,使同学能够了解数字信号处理理论和算法的实现及应用开发。

为了提高同学对数字信号处理课程的学习兴趣,以及增加对数字信号处理学科相关科学家的了解,本书在每章后安排了科学家简介,介绍与本学科相关的一些著名科学家。

本书由西北大学赵健教授、王宾博士和陕西师范大学马苗副教授共同完成,在本书的编写过程中,得到了西北大学、陕西师范大学、西北工业大学、西安电子科技大学等许多老师的指导与帮助,在此向他们表示衷心的感谢。同时感谢研究生:唐洁、雷小培、孙成、王瑞、孙道达、魏菲、张勤等所做的辛勤工作。

限于作者的水平,书中不妥之处在所难免,恳切希望读者给予批评指正。

作 者

2011 年 11 月 于西安

CONTENTS

目

录

第 1 章 绪论	1
1.1 数字信号处理的基本概念	1
1.2 数字信号处理的应用	3
1.3 数字信号处理的研究内容	4
1.4 MATLAB 在信号处理中的应用简介	6
第 2 章 离散时间信号和离散时间系统	9
2.1 离散时间信号——序列	9
2.1.1 序列的定义	9
2.1.2 常用的基本序列	10
2.1.3 序列的基本运算	14
2.2 离散时间系统	16
2.2.1 系统定义	16
2.2.2 线性离散时间系统	16
2.2.3 时不变离散时间系统	16
2.2.4 线性时不变离散系统	17
2.2.5 离散卷积的计算	18
2.2.6 离散卷积的运算规律	23
2.3 系统的稳定性和因果性	24
2.3.1 稳定性	24
2.3.2 因果性	25
2.4 离散时间信号和系统的频域表示	26
2.4.1 线性时不变系统对复指数序列 $e^{j\omega n}$ 的响应	26
2.4.2 频率响应	27
2.4.3 序列的离散时间傅里叶变换	28
2.4.4 描述系统输入和输出关系的频域方法	30
2.5 序列的离散时间傅里叶变换的性质	31
2.6 连续时间信号的采样	34

2.6.1	采样的基本概念	34
2.6.2	采样过程中频谱的变化	35
2.6.3	低通信号采样定理	36
2.6.4	信号恢复	37
2.6.5	窄带信号采样定理	38
2.7	Z 变换	42
2.7.1	Z 变换的定义和收敛域	42
2.7.2	Z 变换的性质和定理	45
2.8	系统函数	51
2.8.1	系统函数定义	51
2.8.2	通过系统函数描述系统特性	51
2.8.3	通过系统函数估算频率响应	53
2.9	系统的网络结构	55
2.9.1	信号流图的表示	56
2.9.2	信号流图的转置定理	57
2.9.3	无限冲激响应(IIR) 系统的网络结构	57
2.9.4	有限冲激响应(FIR) 系统的网络结构	59
2.9.5	方框图的表示	60
2.9.6	方框图的等效	61
2.9.7	无限冲激响应(IIR) 系统的方框图结构	62
2.9.8	有限冲激响应(FIR) 系统的方框图结构	65
2.10	离散时间信号与系统的 MATLAB 表示	67
2.10.1	离散时间信号的表示和运算	67
2.10.2	离散时间信号的频域变换	68
2.10.3	离散时间系统的表示	73
2.10.4	离散时间系统的输入输出关系	76
2.10.5	离散时间系统的网络结构	78
习题		83
第 3 章	离散傅里叶变换	86
3.1	离散傅里叶级数	86
3.1.1	有限长序列的离散频域表示	88
3.1.2	DFS 的性质	89
3.2	离散傅里叶变换	91
3.2.1	离散傅里叶变换的定义	91
3.2.2	DFT 的性质	93
3.2.3	有限长序列的线性卷积和圆周卷积	98
3.2.4	$X(k)$ 与 Z 变换 $X(z)$ 、序列傅里叶变换 $X(e^{j\omega})$ 之间的关系	100
3.3	频域采样理论	100

3.4	频率分辨率与 DFT 参数的选择	103
3.5	离散傅里叶变换的 MATLAB 实现	104
	习题	108
第 4 章	快速傅里叶变换	111
4.1	DFT 的运算特点	111
4.2	基 2-FFT 算法	112
4.2.1	按时间抽取基 2-FFT 算法	112
4.2.2	按频率抽取基 2-FFT 算法	116
4.3	IDFT 的快速算法	119
4.4	基 4-FFT 算法	120
4.5	实序列的 FFT 算法	123
4.6	FFT 的程序设计流程	124
4.7	FFT 的 MATLAB 实现	127
	习题	131
第 5 章	数字滤波器设计	133
5.1	数字滤波器的基本概念	133
5.2	IIR 数字滤波器设计	134
5.2.1	模拟滤波器设计	134
5.2.2	冲激响应不变法	141
5.2.3	双线性映射法	145
5.2.4	IIR 数字滤波器的频率变换设计法(高通、带通和带阻数字 滤波器设计)	150
5.2.5	IIR 数字滤波器的直接设计法	152
5.3	FIR 数字滤波器设计	159
5.3.1	FIR 数字滤波器的线性相位特性	159
5.3.2	窗函数设计法	163
5.3.3	频率采样设计法	174
5.3.4	切比雪夫逼近设计法	178
5.4	IIR 数字滤波器与 FIR 数字滤波器比较	183
5.5	数字滤波器设计的 MATLAB 实现	184
5.5.1	IIR 数字滤波器的 MATLAB 实现	184
5.5.2	FIR 数字滤波器的 MATLAB 实现	187
	习题	191
第 6 章	数字信号处理应用	193
6.1	静态数字图像数据压缩技术	193
6.1.1	JPEG 压缩概述	194

6.1.2	离散余弦变换	195
6.1.3	量化	195
6.1.4	Z字形排列	196
6.1.5	DPCM 编码	196
6.1.6	RLE 编码	196
6.1.7	熵编码	196
6.1.8	JPEG 文件格式	197
6.1.9	JPEG 编码器 MATLAB 实现	197
6.2	心电信号处理技术	197
6.2.1	心电信号概述	197
6.2.2	心电信号特点	198
6.2.3	心电信号去噪	199
6.3	语音信号处理技术	202
6.3.1	语音信号处理概述	202
6.3.2	语音信号中的时域特征	203
6.3.3	语音信号中的频域特征	207
6.3.4	语音信号识别	210
6.4	无线通信调制技术	210
6.4.1	无线通信概述	210
6.4.2	OFDM 基本原理	212
6.4.3	OFDM 系统结构	212
6.4.4	OFDM 技术特点	214
6.5	数字信号处理的硬件实现	215
6.5.1	数字信号处理硬件平台	215
6.5.2	基于 FPGA 的数字信号处理实现	216
6.5.3	基于 DSP 的数字信号处理实现	222
附录 A	模拟器滤波器设计参数表	236
附录 B	切比雪夫滤波器设计参数表	238
附录 C	MATLAB 主要命令函数表	242
参考文献		247

绪论

1.1 数字信号处理的基本概念

20 世纪 60 年代以来,计算机科学、半导体科学和信息科学的迅猛发展和取得的巨大进步,有力地促进了数字信号处理(digital signal processing, DSP^①)技术的发展,使其在很多领域得到了广泛应用,并逐步形成了一门独立的学科体系。目前,国内外绝大多数重点工科院校中,都开设了“数字信号处理”课程,并将其作为一门重要的技术基础课。在一些著名高校,还建立了数字信号处理技术研究中心,把教学、科研和人才培养紧密结合起来,在理论和实际应用方面取得了丰硕成果。目前,数字信号处理器(digital signal processor, DSP)芯片以及相应的外围设备,正在形成一个具有巨大潜力的产业和市场。

什么是数字信号处理?它有哪些应用呢?它研究的基本内容有哪些呢?

所谓信号处理就是对信号(观测数据)进行所需要的变换,或按照预定的规则进行简单或复杂的数学运算,使之便于分析、识别和加以利用。信号处理一般包括:变换、滤波、检测、频谱分析、调制解调和编码解码等,其中滤波的物理概念最为人们熟悉和理解。

信号处理按信号的表示和处理形式分为“模拟信号处理”和“数字信号处理”。模拟信号处理是传统的信号处理手段,它采用模拟设备对模拟信号进行处理。模拟信号处理的优点是它具有实时性和简易性,但由于模拟系统的局限性,它不能进行复杂的信号处理任务。数字信号处理是利用专用或通用数字系统(包括计算机)以二进制计算的方式对数字信号进行处理。数字信号处理系统具有很多优点,可以完成复杂的处理任务,在很多场合正逐步取代传统的模拟信号处理。

通过图 1-1 可以简单说明一个数字信号处理系统处理模拟信号的基本过程。

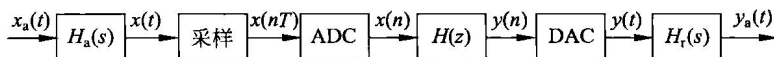


图 1-1 用数字方法处理模拟信号的过程

① 本文中 DSP 通常表示数字信号处理,若上下文涉及处理器及其他硬件系统, DSP 表示数字信号处理器。

在这个处理过程中, $H_a(s)$ 称作前置模拟低通滤波器, 它的作用是对模拟信号 $x_a(t)$ 进行预处理, 改善信号的带限性能, 有利于后续的采样, 具有抗混叠作用; 采样的作用是对滤波后的模拟信号 $x(t)$ 进行自变量 t 的离散化, T 为均匀采样间隔; ADC 是模数转换器, 是对采样后的信号进行幅度二进制量化, 使信号变成离散的二进制数据 $x(n)$; $H(z)$ 表示一个数字信号处理系统, 它包含具体的数字信号处理算法, 完成对 $x(n)$ 的处理; DAC 是数模转换器, 它把处理后的数字信号 $y(n)$ 转换成模拟信号 $y(t)$, 若系统不要求输出是模拟信号, 这一环节可以省去; $H_r(s)$ 表示一个模拟低通滤波器, 它的作用是平滑 DAC 的输出, 滤除 DAC 引起的高频噪声。在这个典型的处理系统中, $H(z)$ 是核心环节, 数字信号处理研究的主要任务是在理论上建立一套描述 $x(n)$, $y(n)$ 和 $H(z)$ 特性的方法和算法, 并研究在工程上如何实现这一系统, 这也是数字信号处理一个最基本的问题。

数字信号处理技术是从 20 世纪 60 年代中期开始迅速发展起来的, 但就其学科本身而言, 历史却很久远, 经典的数值分析方法(如内插、数值积分、微分等)可以看成早期的数字处理技术。简单地看, 数字信号处理就是将一些信号分析和信号处理的理论方法变成一种能够实际应用的算法, 并采用与之相关的硬件和软件技术加以实现, 因此数字信号处理有很强的应用背景以及与其他学科紧密的相关性。

对信号的分析 and 处理, 人们很早就进行了研究, 例如傅里叶变换, 被广泛用于信号的频域分析, 但由于实际中傅里叶变换实现非常困难, 所以信号处理的水平停留在一些只能进行简单信号处理的模拟方法上, 而且不能达到很高性能。计算机发明后, 数字信号处理方法得到了发展。但因为实时性和经济性还不能满足大多数应用领域, 因此, 数字信号处理方法并没有真正得到应用, 因而 20 世纪 60 年代之前, 数字信号处理技术发展极其缓慢。随着大规模集成电路(芯片)技术的发展和快速算法的出现, 数字信号处理进入了广泛的应用和实用阶段。主要表现在数字信号处理的实时性和经济性方面有了较大改进, 特别是著名的快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)的发明, 从此, 数字信号处理进入了一个崭新的高速发展阶段。目前, 数字信号处理仍是最有活力和发展最快的领域之一。

从数字信号处理的发展过程看, 它是紧紧围绕着理论、实现和应用 3 个方面展开的, 它以众多学科为理论基础, 其成果也渗透到众多学科, 成为理论和实践并重、在高新技术领域占有重要地位的新兴学科。与模拟信号处理相比, 数字信号处理的突出优点主要体现在: 精度高、灵活性好、抗干扰能力强、体积小、造价低、功能强、速度快和适用范围广。

1. 精度高

数字信号处理系统的精度主要取决于数字器件的精度, 具体就是字长, 字长越长, 精度越高。众所周知, 计算机的高精度是依靠超字长的结构来保证的。在很多精密的处理和测量系统中, 必须采用数字信号处理技术, 否则就无法达到所需的精度和性能要求。另外, 有些性能 DSP 系统很容易实现, 而使用模拟系统实现却相当困难, 例如, FIR 数字滤波器可以实现准确的线性相位特性, 这种特性用模拟系统实现比较复杂。

2. 灵活性好

用数字信号处理系统完成一个信号处理功能时, 可以通过软件方便地调整和改变系统的性能, 控制整个系统的运行状态, 体现了系统的可编程性。另外, 可以在实验室对系统的参数进行硬件和软件仿真模拟, 以估计整个系统的质量。

3. 可靠性高

数字信号处理系统大多是由 CPU、存储器和 I/O 接口器件等数字集成电路器件构成,受环境因素的影响相对模拟器件要小得多,可编程系统还可以采用许多抗干扰方法,大大提高了系统的可靠性。

4. 便于大规模集成

数字信号处理系统主要由中大规模集成电路等器件构成,便于大规模集成和生产,可大大降低生产成本,特别是在处理极低频率的信号时,体积重量不受影响,比模拟系统要优越许多。

5. 复用性强

利用一套数字信号处理系统可以同时处理多路数字信号,因为数字信号的各采样点之间有一定的采样间隔,在这个间隔里可以同时处理几路信号。另外,在级联数字信号处理系统中,为节省成本,可以使用一个低阶环节分时执行,来完成总系统的任务。这都属于一种时分复用的结构。图 1-2 是一个数字信号处理系统时分复用的示意图。

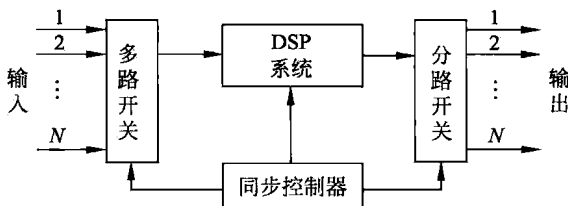


图 1-2 数字信号处理系统时分复用示意图

同步控制器通过多路开关控制各路信号,在时间上前后错开(利用采样间隔),依次进入数字信号处理系统,数字信号处理在处理完第 1 路的某时刻值后,再处理第 2 路,处理完第 2 路后,再处理第 3 路,依此类推;同步控制器通过分路开关将处理结果分别送到各路输出,然后进行下一时刻的处理,在各路输入信号输入下一个值之前,数字信号处理系统已将当前时刻的各路信号处理完一次,并将结果送到各路输出,对每路信号来讲,都好像单独使用数字信号处理系统一样。实现这种功能要依靠数字信号处理系统中处理器的运算速度来保证,即在一个采样间隔里,数字信号处理系统必须完成每一路信号在当前时刻的处理任务。另外,有一种频分复用系统,利用信号在频谱上的差别来区分系统,它与前面的复用概念不同。

6. 多维处理

数字信号处理系统可以配备大容量的外部存储器,可以将多帧图像或多路传感器信号存储起来,实现二维或多维信号的处理,例如:激光影碟机、医用 CT 等图像处理设备就是依靠数字信号处理系统完成了复杂图像编码、压缩和解码以及扫描成像等处理。

1.2 数字信号处理的应用

数字信号处理技术巨大的应用潜力吸引了众多学科的研究者,数字信号处理在众多领域的成功应用也极大地促进了其本身的发展,它已经成为应用最快、成效最为显著的学科之

一。数字信号处理广泛用于通信、雷达、声呐、语言和图像处理、生物医学工程、仪器仪表、机械振动和控制等众多领域。近年来,随着 DSP 芯片技术的发展,数字信号处理在通信,特别是个人通信(personal communication)、网络、家电和外设控制等方面显示了强劲的应用势头。

文献[2,3]将数字信号处理的应用归纳为 11 个大类,100 多个方面,下面仅列出一些典型的应用。

- (1) 通用数字信号处理: 数字滤波、卷积、相关、希尔伯特变换、FFT、信号发生器等;
- (2) 语音: 语音通信、语音编码、识别、合成、增强、文字-语音自动翻译等;
- (3) 图像图形: 机器视觉、图像传输/压缩、图像识别、增强和恢复、断层扫描成像等;
- (4) 控制: 磁盘控制器、机器人控制、激光打印机、电机控制、卡尔曼滤波等;
- (5) 军事: 雷达、保密通信、声呐、导航、导弹制导、传感器融合等;
- (6) 电讯/通信: 回声对消、调制解调器、蜂窝电话、个人通信、视频会议、自适应均衡、编码/译码、GPS 等;
- (7) 汽车: 自动驾驶控制、故障分析、导航、汽车音响等;
- (8) 消费: 数字音响/电视、MP3 播放器、数码相机、音乐综合器等。

数字信号处理技术的应用,目前正以惊人的速度向前发展。随着数字器件的成本降低、体积缩小及运算速度的提高,特别是高速 A/D 器件和高速 DSP 芯片的广泛使用,使得它的应用前景更加广阔。目前,已经有多种专用数字滤波器芯片和 FFT 芯片可供选用,几乎所有的语音宽带压缩系统都采用了全数字化,数字信号处理机已成为现代化雷达和声呐系统不可缺少的组成部分。数字信号处理的应用和开发成本越来越低,开发手段也越来越先进和方便。

1.3 数字信号处理的研究内容

数字信号处理的研究内容在理论和应用上涉及的范围极其广泛,数学中的微积分、随机过程、数值分析、矩阵和复变函数等都是它的基本工具;线性系统理论、信号与系统等都是它的理论基础;同时它和最优控制、通信理论以及人工智能、模式识别、神经网络等新兴学科有关联;在算法实现和数字信号处理系统开发和应用中,要涉及模拟电路、计算机及许多新兴集成电路芯片技术。

由于快速傅里叶变换(FFT)的诞生,数字信号处理在理论和应用方面得到了极大发展和丰富。数字信号处理的研究内容一般可以分为三大类:一维数字信号处理、多维数字信号处理和数字信号处理系统实现。一维数字信号处理主要研究一维离散时间信号和系统,是数字信号处理最重要、最基本的研究内容,也是本书所讨论的主要内容。多维数字信号处理主要研究二维图像、阵列传感器离散信号和系统,属较深的研究内容。数字信号处理系统实现主要研究前两类理论中的算法和系统(数字滤波器)的软件和硬件实现,包括系统结构、方案制定、芯片选择、软硬件开发等,主要面向数字信号处理的应用领域。前两类研究内容属理论和算法,第三类研究内容属应用。

数字信号处理的理论主要包括:

- (1) 模拟信号的采样(A/D 变换、采样理论、量化噪声分析等);
- (2) 离散信号分析(时域及频域分析、傅里叶变换、Z 变换、希尔伯特变换等);

(3) 离散系统分析与综合(离散系统描述、因果及稳定性、线性时不变系统、卷积、系统频率响应、系统函数、数字滤波器设计等);

(4) 信号处理的快速算法(FFT、快速卷积与相关);

(5) 信号处理的特殊算法(抽取、插值、奇异值分解、反卷积、投影与重建等)。

数字信号处理所研究的信号包括确定性信号、平稳和非平稳随机信号、时变和时不变信号、一维和多维信号、单通道和多通道信号,所研究的系统包括线性和非线性系统、时变和时不变系统、二维和多通道系统。对每一类信号和系统,上述理论又有所不同。

数字信号处理系统实现方法一般分为下面几种:

(1) 在通用计算机上用软件实现。软件采用高级语言编写,也可利用商品化的各种数字信号处理软件(MATLAB、SYSTEMVIEW 等)。这种实现方法简单、灵活,但实时性较差,很少用于实时系统,主要用于教学或科研的前期研制阶段。

(2) 用普通单片微控制器(MCU)实现。单片机技术发展很快,功能越来越强,可以用来做一些简单信号处理,但不能用于复杂的信号处理,可以用于比较简单的控制场合,如小型嵌入系统、仪表等。

(3) 用 ASIC 芯片实现。专用集成电路(ASIC)为全定制的数字系统,ASIC 的实现与其他相比更加迅速和有效,对于大批量生产,ASIC 的生产成本相对较低;但由于 ASIC 流片时间长,ASIC 设计过程复杂并且代价高,由于不具备可重复编程的能力和 ASIC 灵活性较差等缺点致使其在数字信号处理领域中应用受限。

(4) 用 FPGA 芯片实现。随着现代现场可编程门阵列(FPGA)的规模、结构和速度的提高,高性能 FPGA 凭借其专用数字信号处理模块和并行处理的优势越来越多地进入到高端数字信号处理的领域。常用的 FPGA 数字信号处理芯片有 Xilinx 公司的 Virtex 和 Spartan FPGA 系列芯片和 Altera 公司的 STRATIX V 系列、ARRIA V 系列和 CYCLONE V 系列芯片,这些 FPGA 系列芯片都已配套了成熟的数字信号处理开发工具和形成了规范的数字信号处理开发流程。

(5) 用通用 DSP 芯片实现。DSP 芯片有着 MCU 无法比拟的突出优点:内部硬件乘法器、流水线和多总线结构、专用 DSP 处理指令,具有很高的处理速度和复杂灵活的处理功能。

(6) 用专用 DSP 芯片实现。市场推出的一些有特殊用途的 DSP 芯片可专门用于 FFT、FIR 滤波、卷积和相关等处理,其软件算法已固化在芯片内部,使用非常方便。这种实现方式比通用 DSP 速度更高,但功能比较单一,灵活性不如通用 DSP 好。

目前世界上生产 DSP 芯片的主要厂家有 TI 公司、ADI 公司、Motorola 公司等,其中 TI 公司的 DSP 产品在全球 DSP 市场份额居领先地位。从目前的市场前景看,数字信号处理技术已经成为今后电子产业的一个主要市场。除了原有的军事应用领域外,它的一个新的主要推动力来自移动通信、智能家居、互联网和物联网等。

数字信号处理的研究内容和理论体系有其自身的特点与规律,因此应按照它本身的规律来学习和研究,而不应当把它看成是模拟信号处理的一种近似。本书在内容的安排上,尽量避免将模拟信号处理的结论生硬地搬到数字信号处理中来。虽然在数字信号处理中有很多概念和结论确实同模拟信号处理中的概念和结论相对应,例如单位采样信号、单位阶跃信号、卷积、傅里叶变换、频率响应等有着非常相似的表示形式,但数字信号处理的概念和结论是按照自身的基本定义和数学方法推导出来的,两者之间并没有直接的关联,而且存在着一

些明显而重要的区别。因此,以前学到的有关模拟信号处理的理论知识,虽然常常在数字信号处理中是有用的,但还是要提醒读者,不要让原有的模拟信号处理的概念,妨碍了对数字信号处理中许多概念的正确理解。

学习数字信号处理时另一个要注意的,就是要以系统为中心,要正确建立数字信号处理的系统概念。一个算法、一个数学表达式、一个流程图,表面上看,虽然是一个抽象的概念,但实际上就是一个具体的数字信号处理系统,可以是一个滤波器,也可以是一个编码器或其他功能的系统,这些算法或数学表达式包含数字信号处理系统最基本的处理单元——加法、数乘和延时,因而,这些抽象的数学式子表示的是一个具体系统中的处理过程。在数字信号处理系统里,简单的“运算”所代表的就是真实系统的“处理”,例如,离散卷积的运算实际上普遍表示了线性时不变离散系统对输入离散信号的真实处理过程。因此在数字信号处理中,很多抽象的数学式子与一个系统有最直接的关联;或者说,算法或数学表达式包含着明确的物理概念,这也可以说是学习数字信号处理的一个难点,或者说是它的一个特点。

1.4 MATLAB 在信号处理中的应用简介

MATLAB 是美国 Mathworks 公司于 1984 年推出的一套高性能的数值计算和可视化软件,它集数值分析、矩阵运算、信号处理、系统仿真和图形显示于一体,广泛地应用于科学计算、控制系统、信息处理等领域的分析、仿真和设计工作。

MATLAB 软件包括五大通用功能:数值计算功能(numeric)、符号运算功能(symbolic)、数据可视化功能(graphic)、数据图形文字统一处理功能(notebook)和建模仿真可视化功能(simulink)。该软件有三大特点:一是功能强大,二是界面友善、语言自然,三是开放性强。目前,Mathworks 公司已推出 30 多个应用工具箱。MATLAB 在线性代数、矩阵分析、数值及优化、数理统计和随机信号分析、电路与系统、系统动力学、信号和图像处理、控制理论分析和系统设计、过程控制、建模和仿真、通信系统以及财政金融等众多领域的理论研究和工程设计中得到了广泛应用。

本章要点

本章主要介绍了数字信号处理的基本概念、特点、研究内容、应用,以及学习方法等。数字信号处理的研究内容和理论体系有其自身的特点与规律,因此应按照它本身的规律来学习和研究,而不应当把它看成是模拟信号处理的一种近似。因此,以前学到的有关模拟信号处理的理论知识,虽然常常在数字信号处理中是有用的,但还是要提醒读者,不要让原有的模拟信号处理的概念,妨碍了对数字信号处理中许多概念的正确理解。学习数字信号处理时另一个要注意的就是要以系统为中心,要正确建立 DSP 的系统概念。在数字信号处理中,很多抽象的数学公式与一个系统有最直接的关联,或者说,算法或数学表达式包含着明确的物理概念,这也可以说是学习数字信号处理的一个难点或者说是它的一个特点。

科学家简介

爱因斯坦(1)

阿尔伯特·爱因斯坦 1879 年 3 月 14 日生于德国乌尔姆,他的父母是德国犹太人。父亲赫尔曼·爱因斯坦爱好数学,他和弟弟雅可布·爱因斯坦开了一家经营电器设备的公司。阿尔伯特的母亲喜爱音乐,性格坚毅,品德高尚。爱因斯坦的家庭具有良好的文化传统,赫尔曼努力培养全家热爱大自然的情感,定期到景色如画的慕尼黑城郊去游玩。

爱因斯坦小时候就有安静独思的习惯,他厌恶同龄伙伴酷爱的军事游戏。他很早就受到独立自主的习惯训练,父母送他穿过慕尼黑最繁华的大街时,第一次向他指明道路,第二次就在一旁注视着他,让他自己穿过大街。爱因斯坦 7 岁时上公立小学,学校的教学方法陈旧呆板。由于他常在课堂上思索问题而不能立即回答老师的提问,曾被老师认为是碌碌无为的庸才。事实上,他的学习成绩是突出的,他母亲 1886 年 8 月 1 日在给姐姐的一封信中写道:“阿尔伯特昨天又一次得到了第一名。”爱因斯坦 1888 年 10 月 1 日进入卢伊特波尔德人文中学。1890 年,爱因斯坦在一个医科大学生塔耳梅引导下开始阅读通俗科学读物,他阅读的书籍有毕希纳的《物质与力》、洪堡的《宇宙》、伯恩斯坦的《自然科学通俗丛书》和康德的《纯粹理性批判》等。这些通俗科学读物对爱因斯坦以后的哲学思想有很大影响,拓展了他的科学兴趣,他开始思考一些自然科学中的基本问题。

1895 年 10 月,爱因斯坦参加了苏黎世联邦工大入学考试,未被录取,但工大校长十分欣赏爱因斯坦的数学才华,把他推荐到瑞士阿劳市的一所州立中学,希望爱因斯坦补习一年后再来投考。爱因斯坦在阿劳州立中学的学习和生活是愉快的。州立中学的教师是学生的朋友,课上得很有趣,学生们能在物理和化学实验室独立工作,能在动物馆用显微镜和手术刀做实验。在这里强调独立、诚实的思考甚于强调博学。此时爱因斯坦已确立了以后要从事科学探索的决心,在一篇作文中他写道:“如果我有幸通过考试,我将到苏黎世的联邦工艺学院学习。在那里我将用四年时间学习数学和物理。我设想自己将能成为一名自然科学某些学科的教授,我的选择是其中的理论性学科。”

1896 年爱因斯坦进入苏黎世联邦工大物理—数学系,这个系是培养物理和数学教师的。在大学他就树立了献身科学的人生观,在一封信中他写道:“紧张的脑力劳动和对神圣大自然的审视,将是引导我通过此生一切烦扰的天使,它虽然冷酷严厉,但却使我心情安宁,信心坚定。”爱因斯坦不满足于课堂上所学的知识,自学了玻耳兹曼、普朗克、费普尔等人的著作。爱因斯坦通过学习赫兹的著作掌握了麦克斯韦电磁场理论。费普尔 1894 年出版的《麦克斯韦电理论》一书无论在内容和形式上都给爱因斯坦以极大教益。爱因斯坦在阅读亥姆霍兹五卷本的《理论物理讲义》中增加了研究认识论的自觉性。马赫在《力学》一书中对牛顿运动定律和绝对时空、惯性观念的批判使爱因斯坦掌握了破旧立新的思想武器。

1899 年爱因斯坦已感到当时的电动力学理论是不正确的,他在 8 月 10 日写的信中说:“我愈来愈深信,像现今所表述的这种动体电动力学是不正确的,它应当有可能用一种比较简单的方式来表示。”美国波士顿大学物理学教授、《爱因斯坦全集》的编者 John. Stachel 在《爱因斯坦和以太漂移实验》一文中指出:有间接的有力证据表明,爱因斯坦在 1889 年一定

知道迈克耳逊-莫雷实验,并且从1889年到1901年间持续感兴趣于设计光学实验以检查地球穿行于以太的假定运动。爱因斯坦本人于1922年在《我是怎样创造了相对论》中说道:“那时我想用某种方法演示地球相对以太的运动……,在给自己提出这一问题时我没有怀疑过以太的存在和地球的运动。于是,我预料如果把光源发出的光线用镜子反射,则当它的传播方向是平行或反平行于地球的运动方向时,应该具有不同的能量。所以我提出使用两个热电偶,利用测量它们所生热量的差值来证实这一点。”

大学四年,爱因斯坦形成了自己的世界观,探讨了哲学认识论,掌握了批判的武器,学习了众多物理大师的著作,对当时的物理学重大问题有着清醒的认识和强烈的兴趣,并努力钻研了电动力学、液体分子运动论等物理学前沿领域,为以后的科学探索奠定了坚实的基础。

1900年7月,爱因斯坦毕业于苏黎世联邦工大,由于他爱好自由和独立思考,不为学校的教授所赏识,他毕业后就失业了。

爱因斯坦毕业前与同学玛丽琦相爱,但他们的恋爱遭到爱因斯坦全家的反对,以致爱因斯坦同家庭的关系几乎决裂,同时他还承受着失业和生活潦倒的痛苦。

1901年3月,爱因斯坦的第一篇论文《由毛细管现象所得的推论》发表了,他用该文向莱比锡大学和哥丁根大学申请助教职位,都遭到了拒绝。他还给奥斯特瓦耳德和昂纳斯写过求职信,也都石沉大海。

1901年5月到7月,爱因斯坦在瑞士温特图尔技术学校做了两个月的代课教师,在教学之余他积极从事科研活动。1902年2月5日,爱因斯坦在伯尔尼的报纸上登了一则教学广告:私人教授数学和物理学。一个多月后,招来了索洛文和哈比希特,爱因斯坦和他俩志趣相投,经常在一起讨论科学和哲学问题,组成了所谓“奥林匹亚科学院”。1901年12月17日,爱因斯坦在给玛丽琦的信中谈到他正在进行关于动体的电动力学方面的研究:“我现在正在全神贯注地研究动体电动力学,可望写成一篇大论文。我曾写信告诉你,我对相对运动的一些想法的正确性产生了怀疑。但我的怀疑仅仅是由于一个简单的数学错误。现在我对它更有信心了。”一个星期后,他又向她告知了同苏黎世大学的克莱内教授会见的情况:“今天我花了整整一个下午去会见苏黎世的克莱内,向他解释我对于动体电动力学的一些想法,并且还同他谈论了物理学的各种问题。”

1902年4月,爱因斯坦在给格罗斯曼的信中写道:“在科学方面已考虑到几个美妙的思想,但是它们还需要好好琢磨……”。“美妙的思想”指的是关于分子力的构成,爱因斯坦接着写道:“感觉到在直接知觉中呈现出互不相关的诸现象的综合统一是多么美妙啊!”事实上,当时经典物理学所碰到的各种问题都是爱因斯坦思考的对象。

1902年6月,爱因斯坦在瑞士伯尔尼专利局获得了三级技术鉴定员的工作。这是他一生中最灿烂辉煌的时期,他在1905年终于创造了科学奇迹。

爱因斯坦于1905年3月发表了题为《关于光的产生和转化的一个启发性观点》的论文,提出了光量子假设;4月和5月发表了两篇关于分子运动说的论文;6月发表了开创物理学新纪元的长篇论文《论动体的电动力学》,建立了狭义相对论;9月又在一篇论文中提出了质能关系式。一个人在短短6个月内在3个不同领域中做出了4项划时代的成就,这是罕见的。当时,年仅26岁的爱因斯坦,是在远离学术机关、没有名师指导、完全靠业余研究而取得了辉煌的成果。