



工业和信息化部“十二五”规划教材

数字信号处理 原理与应用

李 勇◎主编



西北工业大学出版社



工业和信息化部“十二五”规划教材

SHUZI XINHAO CHULI YUANLI YU YINGYONG

数字信号处理 原理与应用

主编 李 勇
编者 李 勇 赵 健
程 伟

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书系统地介绍数字信号处理的基本理论和原理以及数字信号和系统的分析与设计方法,同时结合工程应用介绍了数字信号处理技术的应用。

全书共分八章,主要内容包括绪论、离散时间信号和系统、离散时间信号傅里叶变换和 z 变换、离散傅里叶变换(DFT)、快速傅里叶变换(FFT)、无限冲击响应(IIR)数字滤波器设计、有限冲击响应(FIR)数字滤波器设计和数字信号处理技术的应用等。每章附有本章知识要点和习题,方便读者抓住重点和掌握要点。

本书可作为高等学校电子信息类等相关专业本科生和硕士研究生的专业课程教材和参考书,也可供科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理原理与应用/李勇主编. —西安:西北工业大学出版社, 2016. 4
工业和信息化部“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5612-4828-7

I. ①数… II. ①李… III. ①数字信号发生器—高等学校—教材 IV. ①TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 085141 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西金德佳印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:12.625

字 数:306 千字

版 次:2016 年 4 月第 1 版 2016 年 4 月第 1 次印刷

定 价:35.00 元

前言

本书作为工业和信息化部“十二五”规划教材,根据普通高等教育本科生教学大纲的要求精心进行选材与编写。本书系统介绍数字信号处理的基本概念、理论和分析与设计方法,同时面向工程简要介绍数字信号处理技术的应用。

本书着力表现出对数字信号处理技术原理和概念进行清晰叙述,更侧重于对基本理论所蕴涵物理概念的透彻理解,同时通过介绍数字信号处理技术在工程实际中的应用,使读者能够把所学的基础理论与实际应用联系起来,能更加直观地理解物理概念。

本书内容涵盖数字信号处理课程经典的基本内容,并补充简单的应用素材。本书基于笔者多年从事数字信号处理课程教学和科研工作的经验,博采众长,吸取了国内外优秀教材和专著的优点。在讲述中特别注重对数学原理和物理概念的透彻讲解,针对工科类学生学习的需求和不同要求,融入世界著名大学同类经典教材的编写理念和内容体系,体现出内容的经典、细腻、明晰、严谨、实用和易学、易懂等特色 and 优点。本书从起笔时就确立了强调物理概念理解的思路,因此在编写时尽量减少生涩、枯燥和冗长的数学描述和推导。本书定位于理工科的本科生教材,部分内容也可以供研究生课程教学使用。

本书配套的专门的数字信号处理实验课教学内容的实验指导书,可以帮助读者完成相应的实验课学习和训练。

本书的先修课程主要是“高等数学”“工程数学”和“信号与系统”,部分内容可能涉及“数字电路”和“微机原理”等课程。

本书的参考学时为 64 学时,第 8 章可能涉及较多的应用背景,若不讲授,教学学时可以减少为 56 学时。对非电子信息类专业或大专学生,可以只讲授第 1~7 章的主要内容,参考学时为 40~48 学时。

本书第 1,2,8 章由李勇编写,第 3,6,7 章由赵健编写,第 4,5 章由程伟编写,全书由李勇统稿。全书附录、习题和插图由程伟和赵健编写与绘制,研究生阮丽华、董理濛、杨军华、于莹洁、施歌等完成了相关计算机仿真。

在本书编写过程中,结合了“数字信号处理”陕西省优秀教学团队和陕西省优质资源共享课的建设任务,并得到了西北工业大学教务处的关心和帮助,在此向他们表示衷心的感谢!

编写本书曾参阅了相关文献资料,在此,向其作者一并致谢。

限于水平,本书仍存在不妥甚至错误之处,恳切希望广大读者给予批评指正。

编者

于西北工业大学

2016 年 2 月

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	4
1.3 数字信号处理的研究内容	4
1.4 数字信号处理的学习方法	6
第 2 章 离散时间信号和系统	7
2.1 信号的基本概念	7
2.2 离散时间信号(序列)	8
2.3 离散时间系统	14
2.4 系统的稳定性和因果性	23
2.5 连续时间信号的采样	24
本章知识要点	33
习题	34
第 3 章 离散时间信号傅里叶变换和 z 变换	36
3.1 线性非时变系统对正弦信号激励的响应	36
3.2 离散时间信号傅里叶变换(DTFT)	36
3.3 线性非时变系统的频域表示方法	42
3.4 离散时间信号的 z 变换	44
3.5 系统函数	53
3.6 常系数线性差分方程及其信号流图表示	57
本章知识要点	71
习题	71
第 4 章 离散傅里叶变换(DFT)	75
4.1 离散傅里叶级数(DFS)	75
4.2 离散傅里叶变换(DFT)	79
4.3 频域采样理论	86
4.4 频率分辨率与 DFT 参数的选择	88
本章知识要点	90
习题	90

第 5 章 快速傅里叶变换(FFT)	92
5.1 DFT 的运算特点和规律	92
5.2 基 2-FFT 算法	93
5.3 IDFT 的快速算法(IFFT)	100
5.4 基 4-FFT 算法	101
5.5 实序列的 FFT 算法	102
本章知识要点	104
习题	104
第 6 章 无限冲击响应(IIR)数字滤波器设计	105
6.1 数字滤波器的基本概念	105
6.2 模拟滤波器设计	106
6.3 IIR 数字滤波器设计	113
本章知识要点	130
习题	130
第 7 章 有限冲击响应(FIR)数字滤波器设计	132
7.1 FIR 数字滤波器的线性相位特性	132
7.2 窗函数设计法	135
7.3 频率取样设计法	148
7.4 切比雪夫逼近设计法	151
7.5 IIR 数字滤波器与 FIR 数字滤波器比较	157
本章知识要点	158
习题	158
第 8 章 数字信号处理技术的应用	161
8.1 数字信号处理器	161
8.2 数字频谱分析方法	166
8.3 音频信号处理	169
8.4 通信信号处理	176
8.5 雷达信号处理	186
本章知识要点	190
习题	190
附录	191
附录 1 模拟滤波器设计参数表	191
附录 2 切比雪夫滤波器设计参数表	192
参考文献	196

第1章 绪论

1.1 数字信号处理的基本概念

数字信号处理,简称 DSP (Digital Signal Processing),是电子信息学科一项重要的专业基础技术,近几十年来得到了广泛的关注和推广应用,显示了其巨大的生命力和应用潜力。纵观 DSP 的发展历程,自 20 世纪 60 年代以来,计算机科学、半导体器件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技术的发展,数字信号处理在很多领域得到了广泛应用,逐步形成了一门独立的学科体系。

我们引用文献[1]对 DSP 的一段描述:数字信号处理是功能最为强大的专业技术之一,它必将在 21 世纪席卷众多的科学和工程领域。实际上,革命性的变化已经在下列领域发生:通信、医学成像、雷达和声呐、高保真音乐、石油勘探等。DSP 在这些领域的应用已形成了各自特殊的算法和专业技术。DSP 起源于 20 世纪 60 年代和 70 年代的数字计算机的发明和使用,在那个时候,计算机是昂贵的,因而 DSP 的应用范围受到限制。开拓性的工作主要集中在四个领域:雷达和声呐,涉及国家安全;石油勘探,涉及巨大的经济利益;空间探索,得到的数据是宝贵和无法替代的;医学成像,涉及拯救生命。80 年代和 90 年代个人计算机(PC)的普及推动 DSP 进入许多新的应用领域。DSP 不仅是为了满足军事和政府需求,而且商业市场的需求也极大地刺激了 DSP 的应用。DSP 在如下商业产品获得应用:移动电话,CD 播放机,电子语音邮件等。目前,数字信号处理器,也称 DSP(Digital Signal Processor),所形成的 DSP 系统技术以及相应的应用,已经形成一个巨大的产业和市场。

DSP 教育主要包含两个任务:一是在总体方面学习 DSP 的基本和通用的理论、概念和应用;二是掌握专业的 DSP 技术应用于专业的领域。20 世纪 80 年代,DSP 课程是为电子工程专业研究生开设的,10 年以后,已经成为大学本科生的标准课程设置,今天 DSP 技术已经成为科学家和工程师的基本技能之一。DSP 可以与早期的电子学进行类比,对于电子工程师,基本电路设计是必要的技能之一,否则就会掉队,今天,DSP 具有同样的含义。近年来,学习和使用 DSP 更是成为人们提高能力需求,而不再是好奇。目前,国内外几乎所有的重点工科院校中,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。在一些高校,还建立了数字信号处理技术的研究机构和平台,把教学、科研和人才培养紧密结合起来,在 DSP 的理论和实际应用方面取得了丰硕成果。

什么是数字信号处理的内涵?它研究的基本内容有哪些呢?它有哪些应用呢?

信号一般是指实际中获得的观测数据,所谓信号处理就是对这些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读者熟悉理解。

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”。模拟信号处理也称连续信号处理,是传统的信号处理手段,它是对模拟信号进行处理的,模拟信号是物理世界中的原始信号,模拟处理的模型是基于模拟系统而言的。模拟信号处理的优点是它的实时性和简易性,但由于模拟系统的局限性,系统性能很难达到很高,也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。数字信号处理的信号既可以是模拟信号,也可以是数字信号,应用较为方便。数字信号处理系统具有很多优点,它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。

图 1.1 所示为一个 DSP 系统处理模拟信号的基本过程。

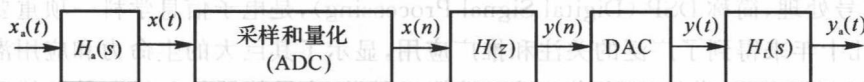


图 1.1 用 DSP 方法处理模拟信号的过程示意图

在图 1.1 所示处理过程中, $H_a(s)$ 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,也称抗混叠滤波器;采样和量化的作用是对滤波后的模拟信号 $x(t)$ 进行离散化和量化编码, T 为均匀采样间隔,它就是工程中的 ADC(Analog to Digital Converter),使模拟信号转换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(Digital to Analog Converter) 是数模转换器,它的作用是把处理后的数字信号 $y(n)$ 转换成到模拟信号 $y(t)$,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,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,并且与其他学科紧密相关。DSP 是一门交叉性很强的学科,依赖许多学科的技术发展,图 1.2 所示为 DSP 和其他学科的关系,它们的边界不是截然分开的,而是相关相互重叠的。如果想成为一个 DSP 专家,则需要学习这些相关学科的知识。

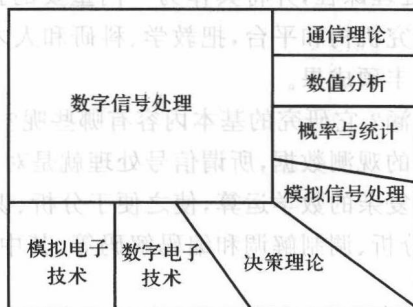


图 1.2 DSP 与其他学科的关系

人们对信号的分析 and 处理,人们实际上很早就进行了研究,例如傅里叶变换,被广泛用于信号的频域分析,但由于过去的技术水平的限制,傅里叶变换的实现非常困难,因而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,而且性能也不强。数字计算机出现以后,数字处理方法得到了快速发展。但因为其实时性和经济性还不能满足大多数应用领域,所以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,数字信号处理才进入了广泛应用的阶段。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的提高,特别是著名的快速傅里叶变换 FFT(Fast Fourier Transform)的出现,从此,数字信号处理进入了一个崭新的高速发展阶段。

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”三个方面展开的,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、功能强、适用范围广。

(1)精度高。DSP 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,对于有些性能,DSP 系统很容易实现,而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就比较困难。

(2)灵活性好。用 DSP 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参数,充分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,以估计整个系统的性能。

(3)可靠性高。DSP 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,与模拟器件相比,它受环境因素的影响要小得多,可编程系统还可以采用许多数字抗干扰方法,可以大大提高系统的可靠性。

(4)便于大规模集成。DSP 系统主要由数字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,体积重量不受影响,优于模拟系统。

(5)复用性强。利用一套 DSP 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,在这个间隔内可以同时处理几路信号。另外,在级联 DSP 系统中,为节省成本,可以使用一个低阶环节分时执行,可完成总系统的任务。这些都属于一种时分复用的结构,图 1.3 所示为一个 DSP 系统内的复用示意图。

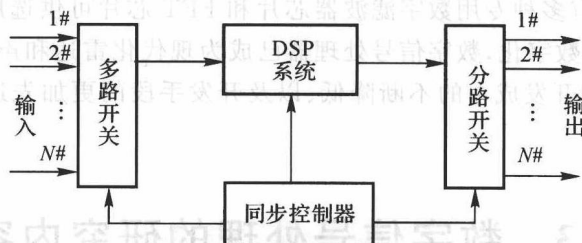


图 1.3 DSP 系统的复用示意图

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 DSP 系统,DSP 在处理完第一路的数据后,再处理第二路,处理完第二路后,再处理第三路……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信号样值之前,DSP 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,这样对于各路信号来讲,都好像单独使用 DSP 系统一样。实现这种功能要依靠 DSP 系统中处理器的运算速度来保证,即在一个采样间隔里,DSP 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。DSP 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,实现二维或多维处理信号的处理,例如:激光影碟机、医用 CT 等图像处理设备就是依靠 DSP 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任务。

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,其在众多领域的成功应用也极大地促进了这门学科的发展,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,DSP 在通信,特别是个人通信 PC(Personal Communication)、网络、家电和外设控制等方面显示了强劲的应用势头。

一些文献将数字信号处理的应用归纳为 11 个大类的 100 多个方面,下面仅列出一些典型的应用:①通用 DSP: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:机器人视觉,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电信/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、汽车音箱等;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,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,数字信号处理器已成为现代化雷达和声呐系统不可缺少的组成部分。DSP 的应用和开发成本的不断降低、以及开发手段的更加先进和方便,使得其应用领域越来越广阔。

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非常广泛,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 DSP 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。

自 20 世纪 60 年代中期,快速傅里叶变换(FFT)的诞生,使数字信号处理在理论和应用方面得到了极大发展和丰富。数字信号处理的主要研究内容一般分为三大类:①一维 DSP: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;②多维 DSP: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;③DSP 系统实现:主要研究上面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、方案制订、芯片选择、软硬件开发等,面向 DSP 的应用领域。前两类研究内容属理论、方法和算法,第三类研究内容属 DSP 系统设计和软硬件开发,一般需要专门的课程学习并需要实验训练。

DSP 的理论内容主要包括:

- (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(时域和频域分析、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、因果和稳定性、线性非时变系统、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、时变和非时变信号、一维和多维信号、单通道和多通道信号。研究的系统包括线性和非线性系统、时变和非时变系统、二维和多通道系统。对于每一类信号和系统,上述理论又有所不同。

DSP 系统实现方法一般分为以下几种。

1. 在通用计算机上用软件实现

软件采用高级语言编写,也可用各种商用软件(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的信号处理,并用于比较简单的控制场合,如小型嵌入系统等。

3. 用高速通用 DSP 芯片实现

DSP 芯片有 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。

4. 用专用 DSP 芯片实现

市场上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。

目前国际上生产 DSP 芯片的主要厂家有 TI 公司 (TMS320 系列)、ADI 公司 (TigerSHARC 系列) 等。从目前的市场前景看, DSP 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、互联网、硬盘和家电控制器 (数码相机和机顶盒) 等。

1.4 数字信号处理的学习方法

DSP 既是一门古老的学科, 又是一项蓬勃发展的技术, 在许多专业领域得到广泛而深入的应用, 对于学生或技术人员来讲, 要在短时间内全面掌握 DSP 几乎是不可能的。DSP 知识的学习应该是循序渐进的, 从理论、方法、算法, 再到实验和应用。DSP 知识的学习既是有趣的, 又是枯燥无味的。例如, 当遇到了一个 DSP 问题时, 在 DSP 教科书和资料中寻找答案, 一定会遇到一页一页的数学公式、晦涩的数学符号和生僻的术语。事实上, 大部分 DSP 文献对这个领域的专家来说也会觉得枯燥无味和难以理解。但实际上, DSP 和工程应用密切相关, 每一个抽象枯燥的数学公式都有着具体和清晰的物理背景和意义。例如, 卷积公式的背后是一个具体的线性时不变系统, 线性差分方程则代表了一个具体系统的实现结构和实现方案, 傅里叶变换就是频谱分析的数学原理, 数字滤波器设计就是按照物理指标确定系统参数的过程, 设计结果就是表示系统的一组线性差分方程。

数字信号处理的学习要注意以系统的概念为中心, 正确建立 DSP 的系统概念。一个算法、一个数学表达式、一个流图, 从表面上看, 是一个抽象的公式、图形、符号等概念, 但实际上就是一个具体的 DSP 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了 DSP 系统最基本的三种处理单元: 加法、数乘和延时 (存储), 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 DSP 系统里, 简单的“数学运算”所代表的就是真实系统的“信号处理”。例如, 离散卷积的运算实际上普遍表示了线性非时变离散系统对输入离散信号的真实处理过程, 所以在数字信号处理中, 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。因此, 学习数字信号处理的一个最大难点就是如何把抽象的数学公式和清晰的物理概念联系起来。需要特别强调的是, 数字信号处理的研究内容和理论体系有其自身的特点和规律, 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, 尽量有意避免将模拟信号处理的结论生硬地搬到数字信号处理中。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分析与处理中的概念和结论相对应, 例如单位取样信号、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分析和处理的理论知识, 虽然常常在数字信号处理中会用到, 但还是要提醒读者, 不要让原有的模拟信号分析与处理的概念, 妨碍了对数字信号处理中许多概念的正确理解。

第2章 离散时间信号和系统

2.1 信号的基本概念

信号在数学上定义为一个函数,这个函数表示一种信息,通常是有关一个物理系统的状态或特性。信号的函数表示是关于一个或几个独立变量的,关于一个独立变量的信号称为一维信号,关于多个独立变量的信号称为多维信号。

多数情况下,独立变量都是有明确物理意义的。例如,语音信号是关于时间的一维信号,静止图像是关于平面位置的二维信号,还可以举出许多具体的信号实例,如温度、压力、流量、电压、电流等物理信号。本书主要讨论一维信号 $x(t)$, t 一般表示时间变量,也可以是其他意义的变量。一般情况下,都将 $x(t)$ 称为随时间变化的信号,或简称为“时间信号”或“时域信号”。

若 t 是定义在时间上的连续变量,称 $x(t)$ 为连续时间信号,也就是模拟信号;若 t 仅在时间的离散点上取值,称 $x(t)$ 为离散时间信号或时域离散信号。实际物理世界中大多数信号都是连续时间信号,如无线电信号、语音信号、心电信号、随时间变化的电压和电流信号等。离散时间信号在实际中很少见到,更多的是一种数学模型,可以通过对连续时间信号的采样获得。

将 $t=nT$ 代入 $x(t)$,可得 $x(nT)$, T 表示的是采样点之间的时间间隔,通常称为采样间隔, n 是一个整数。但也有一些离散时间信号本身就是离散的,例如,某地区的年降雨量或年平均增长率等信号,这类信号的时间变量为年,而且只能取整数的时间值,不在整数时间点的信号是没有定义(意义)的,如某年某月的年降雨量是没有意义的,因此,这类信号的自变量本身只能定义为整数值,但其本身具有物理含义。因此,离散时间信号可以表示成下列形式:

$$\{x(nT)\}, \quad n=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (2.1)$$

在很多场合下, $x(nT)$ 的值完全可以由 n 来确定, T 可以省去,或将 T 取为 1,在大多数 DSP 系统中, $x(nT)$ 的存放是按 n 来放置的,不同的 $x(nT)$ 只要靠 n 就可区别。因此,将 $x(nT)$ 表示为 $x(n)$,这是一种数学的抽象表达形式,在表示方式和数学推导上更加简洁,而且有利于应用成熟的数学工具来建立离散时间信号和系统的理论。但这种表示也有缺陷,它忽略了信号变量本身的物理意义,容易让读者的思路限于对数学符号的理解,后面对信号频域表示,也是采用了这种抽象的方式,而忽略了对频率物理意义的理解。

2.2 离散时间信号(序列)

2.2.1 序列的定义

一个离散时间信号(序列)定义为

$$\{x(n)\}, \quad n=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (2.2)$$

式(2.2)中符号 $\{x\}$ 表示一种信号的集合,集合中的一个元素 $x(n)$ 表示第 n 时刻的离散时间信号 $\{x(n)\}$ 的值, $\{x(n)\}$ 定义在 n 等于整数点上,在 n 不等于整数点上, $\{x(n)\}$ 没有定义,但并不表示信号值为零。

为书写方便,上面的定义式(2.2)常常简化为用 $x(n)$ 表示 $\{x(n)\}$,虽然严格地说, $x(n)$ 表示 $\{x(n)\}$ 中第 n 个信号值,但一般的理解, n 是变量,所以在不引起混淆的情况下,仍采用 $x(n)$ 表示整个离散时间信号。

从数学级数的角度看,式(2.2)的集合表示一个级数或序列,因此,也把离散时间信号称作离散时间序列,简称序列,后面说的序列就是指离散时间信号。

序列除了用数学表达式外,还常常采用图形方式来表示,如图2.1所示。虽然横坐标画成一条连续的直线,但 $x(n)$ 仅仅对于整数的 n 值才有意义。

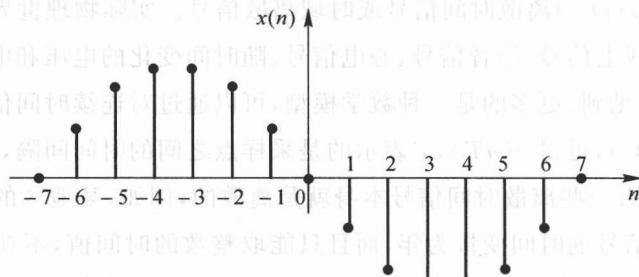


图 2.1 离散时间信号的图形表示

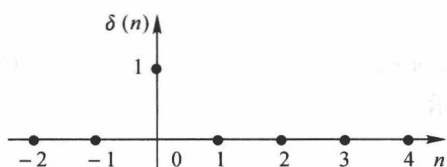
离散时间信号在幅度上定义成连续的,它和我们所说的数字信号并不是完全相等的。数字信号是指将离散时间信号的幅度进行均匀量化后的信号,也就是在时间和幅度上都取离散值的信号,在工程中,数字信号就是模数转换器的输出信号。因此,离散时间信号并不等于数字信号,但由于数字信号是幅度量化的,在数学表示和推导中不如离散时间信号的形式方便和容易,而且两者之间的差别仅仅是幅度的量化误差,一般也不大。所以在课程学习时一般都采用离散时间信号来讨论数字信号处理的理论和算法,得到的结论可以简单地推广到数字信号,仅仅需要考虑幅度量化的有限字长效应,这是研究数字信号处理采用的普遍方法,因此,在本书中,除非特别说明,我们讨论的都是离散时间信号,也就是序列。

2.2.2 常用的基本序列

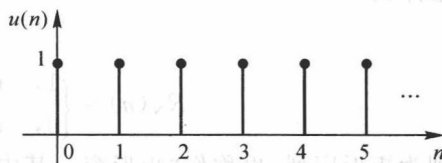
1. 单位取样序列

$$\delta(n) = \begin{cases} 1, & n=0 \\ 0, & n \neq 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

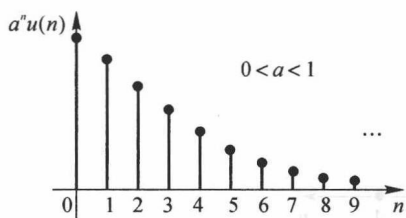
式中, $\delta(n)$ 称为单位取样序列, 它的图形如图 2.2(a) 所示。 $\delta(n)$ 看起来和连续时间信号中的单位冲击信号 $\delta(t)$ 相似, 它所起的作用和 $\delta(t)$ 也很相似, 有时称 $\delta(n)$ 为离散冲击信号, 但两者有着明显的区别。 $\delta(n)$ 的定义简单而精确, 是一个真实的物理信号, 而 $\delta(t)$ 采用的是极限定义, 是一种纯粹的数学抽象, 不表示一种实际的信号。



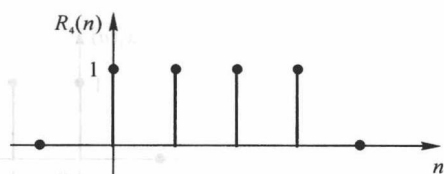
(a)



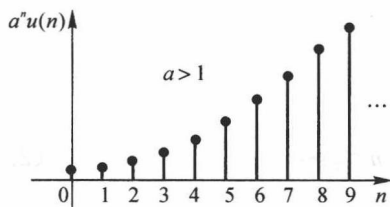
(b)



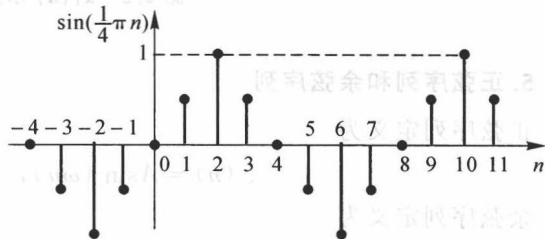
(c)



(d)



(e)



(f)

图 2.2 典型序列图

(a) 单位采样序列和单位冲激信号; (b) 单位阶跃序列; (c) 实指数序列; (d) 矩形序列; (e) 正弦序列

2. 单位阶跃序列

定义

$$u(n) = \begin{cases} 1, & n \geq 0 \\ 0, & n < 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

式中, $u(n)$ 称为单位阶跃序列, 它的图形如图 2.2(b) 所示。 $u(n)$ 可以表示成很多移位的 $\delta(n)$ 序列之和, 即

$$u(n) = \sum_{k=0}^{\infty} \delta(n-k) \quad (2.5)$$

类似地, $u(n)$ 也可以用来表示单位取样序列 $\delta(n)$:

$$\delta(n) = u(n) - u(n-1) \quad (2.6)$$

3. 实指数序列

$$x(n) = a^n, \quad -\infty < n < \infty \quad (2.7)$$

式中, a 为实常数, 实指数序列的图形如图 2.2(c) 所示。

4. 矩形序列

定义

$$R_N(n) = \begin{cases} 1, & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0, & n \text{ 为其他} \end{cases} \quad (2.8)$$

该序列为矩形序列, 也称作“矩形窗”, 其中 N 称为窗的宽度, 图形表示如图 2.2(d) 所示 ($N=4$)。 $R_N(n)$ 可以用来得到一个有限长(宽)序列, 如通过式(2.9)运算把一个无限长或很长的序列 $x(n)$ 变成长度为 N 点的序列 $x_1(n)$:

$$x_1(n) = x(n)R_N(n), \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (2.9)$$

$x_1(n)$ 的图形如图 2.3 所示。

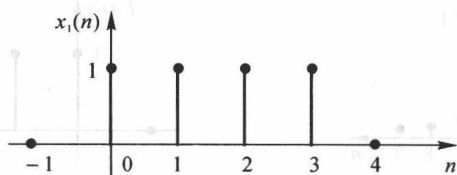


图 2.3 $x_1(n)$ 示意图 ($N=4$)

5. 正弦序列和余弦序列

正弦序列定义为

$$x(n) = A \sin(\omega n), \quad -\infty \leq n \leq \infty \quad (2.10)$$

余弦序列定义为

$$x(n) = A \cos(\omega n), \quad -\infty < n < \infty \quad (2.11)$$

式中, A 为序列的振幅; ω 为序列的数字频率(或数字角频率)。它是一个非常重要的概念, 在序列的频域分析、离散时间系统的频率响应以及数字滤波器设计中都起着重要的作用。图 2.2(e) 所示是一个正弦序列的图形。

下面介绍周期序列的概念。