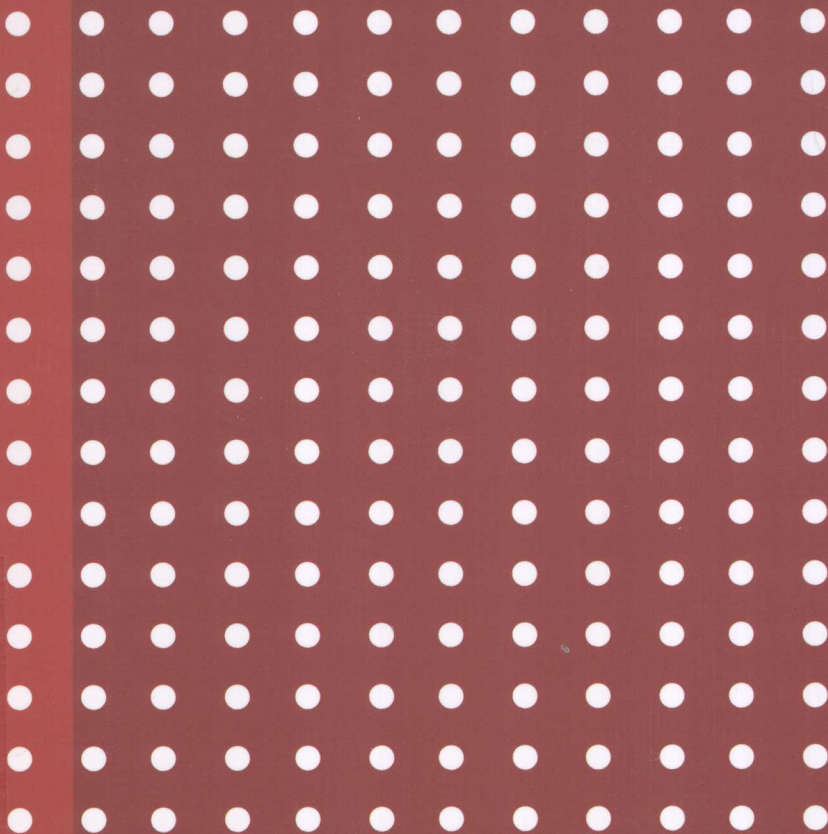


21世纪高等学校电子信息工程规划教材

数字信号处理原理和算法实现 (第2版)

李 莉 主编
张 倩 俞玉莲 副主编



清华大学出版社

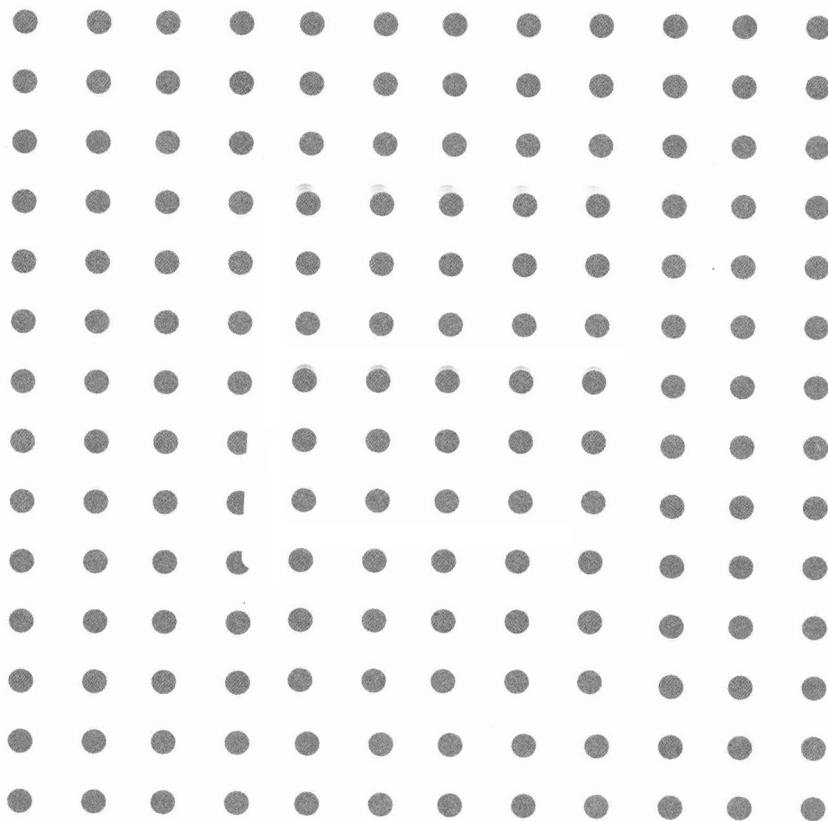


21世纪高等学校电子信息工程规划教材

数字信号处理原理和算法实现 (第2版)

李莉 主编

张倩 俞玉莲 副主编



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书针对工程应用型本科专业的教学特点,系统介绍数字信号处理的基本理论、基本方法,强调实际应用。通过典型的应用实例、提供的源程序帮助读者理解和掌握基础理论的基本应用,激发学生的学习兴趣。

本书第1章~第4章介绍离散时间信号和系统的基本概念、变换域(Z 域)分析、离散傅里叶变换(DFT)及FFT的基本原理;第5章介绍数字系统的基本网络结构;第6章和第7章介绍IIR、FIR滤波器的设计方法。

根据教学要求可选用与本教材配套的《数字信号处理实验教程》,对课堂教学、实验教学和课外拓展内容安排进行选择 and 组合。

本书可作为通信、电子信息、计算机应用技术等相关专业本科生教学用书,也可作为从事数字信号处理工作的工程技术人员的参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

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

数字信号处理原理和算法实现/李莉主编.--2版.--北京:清华大学出版社,2016
21世纪高等学校电子信息工程规划教材
ISBN 978-7-302-40368-5

I. ①数… II. ①李… 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(2015)第114501号

责任编辑:黄芝 薛阳

封面设计:常雪影

责任校对:焦丽丽

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 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

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:18 字 数:432千字

版 次:2010年2月第1版 2016年9月第2版 印 次:2016年9月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.00元

出版说明

随着我国高等教育规模的扩大和产业结构调整的进一步完善,社会对高层次应用型人才的需求将更加迫切。各地高校紧密结合地方经济建设发展需要,科学运用市场调节机制,合理调整和配置教育资源,在改革和改造传统学科专业的基础上,加强工程型和应用型学科专业建设,积极设置主要面向地方支柱产业、高新技术产业、服务业的工程型和应用型学科专业,积极为地方经济建设输送各类应用型人才。各高校加大了使用信息科学等现代科学技术提升、改造传统学科专业的力度,从而实现传统学科专业向工程型和应用型学科专业的发展与转变。在发挥传统学科专业师资力量强、办学经验丰富、教学资源充裕等优势的同时,不断更新其教学内容、改革课程体系,使工程型和应用型学科专业教育与经济建设相适应。

为了配合高校工程型和应用型学科专业的建设和发展,急需出版一批内容新、体系新、方法新、手段新的高水平电子信息类专业课程教材。目前,工程型和应用型学科专业电子信息类专业课程教材的建设工作仍滞后于教学改革的实践,如现有的电子信息类专业教材中有不少内容陈旧(依然用传统专业电子信息教材代替工程型和应用型学科专业教材),重理论、轻实践,不能满足新的教学计划、课程设置的需要;一些课程的教材可供选择的品种太少;一些基础课的教材虽然品种较多,但低水平重复严重;有些教材内容庞杂,书越编越厚;专业课教材、教学辅助教材及教学参考书短缺,等等,都不利于学生能力的提高和素质的培养。为此,在教育部相关教学指导委员会专家的指导和建议下,清华大学出版社组织出版本系列教材,以满足工程型和应用型电子信息类专业课程教学的需要。本系列教材在规划过程中体现了如下一些基本原则和特点:

(1) 系列教材主要是电子信息学科基础课程教材,面向工程技术应用的培养。本系列教材在内容上坚持基本理论适度,反映基本理论和原理的综合应用,强调工程实践和应用环节。电子信息学科历经了一个多世纪的发展,已经形成了一个完整、科学的理论体系,这些理论是这一领域技术发展的强大源泉,基于理论的技术创新、开发与应用显得更为重要。

(2) 系列教材体现了电子信息学科使用新的分析方法和手段解决工程实际问题。利用计算机强大功能和仿真设计软件,使电子信息领域中大量复杂的理论计算、变换分析等变得快速简单。教材充分体现了利用计算机解决理论分析与解算实际工程电路的途径与方法。

(3) 系列教材体现了新技术、新器件的开发应用实践。电子信息产业中仪器、设备、产品都已使用高集成化的模块,且不仅仅由硬件来实现,而是大量使用软件和硬件相结合的方法,使产品性价比很高。如何使学生掌握这些先进的技术、创造性地开发应用新技术是本系列教材的一个重要特点。

(4) 以学生知识、能力、素质协调发展为宗旨,系列教材编写内容充分注意了学生创新能力和实践能力的培养,加强了实验实践环节,各门课程均配有独立的实验课程和课程

设计。

(5) 21世纪是信息时代,学生获取知识可以是多种媒体形式和多种渠道的,而不再局限于课堂上,因而传授知识不再以教师为中心,以教材为唯一依托,而应该多为学生提供各类学习资料(如网络教材,CAI课件,学习指导书等)。应创造一种新的学习环境(如讨论,自学,设计制作竞赛等),让学生成为学习主体。该系列教材以计算机、网络和实验室为载体,配有多种辅助学习资料,可提高学生学习兴趣。

繁荣教材出版事业,提高教材质量的关键是教师。建立一支高水平的以老带新的教材编写队伍才能保证教材的编写质量和建设力度,希望有志于教材建设的教师能够加入到我们的编写队伍中来。

21世纪高等学校电子信息工程规划教材编委会

联系人:魏江江 weijj@tup.tsinghua.edu.cn

前 言

随着信息技术的发展,数字信号处理基础知识已成为通信、电子信息、计算机应用技术等相关专业本科学生必须学习和掌握的专业基础知识。

本书针对工程应用型本科专业的教学特点,注重数字信号分析和数字处理系统的基本原理和应用实现。系统介绍数字信号处理的基本概念、时间离散信号与系统的变换域分析方法、离散傅里叶变换原理及应用、数字滤波器的设计与实现和数字信号处理器应用实现。

本书将基础理论与实际应用密切结合,通过典型的应用实例,使读者在学习基础理论时,能够掌握数字信号处理的基本应用。本书在算法设计方面未给出严格完整的数学证明,需要的读者可参阅相关书籍。教师可以根据学生的实际情况在课堂讲授部分应用例子,还有大部分例子供学生自己阅读,在巩固学生对基本概念的理解和应用的同时,扩大学生的知识面。

本书的另一特色是将 MATLAB 软件引入到数字信号处理的课堂教学和实践环节中。基于 MATLAB 的演示课件,从文字、图像、声音、动画等方面多维地揭示算法设计、实现过程和信号处理效果,有效地提高了教学效果;所配备的实验源程序,利于激发学生的学习兴趣。

本书是在 2010 年我们所编《数字信号处理原理和算法实现》(21 世纪高等学校电子信息工程规划教材)原书的基础上进行修改而成的;考虑到工程应用型本科专业的教学课程体系中通常另开设偏重基于数字信号处理芯片开发平台的单独课程,故此次修订删除了原书的第 8 章,使本书内容更加适合数字信号处理基础课堂教学。

本书第 1 章~第 3 章侧重基本概念原理;第 4 章对读者进行工程项目开发有指导意义;第 5 章~第 7 章介绍数字处理系统设计的相关算法。根据教学要求,教师安排一定的 MATLAB 软件仿真实验课时在数字信号处理教学中至关重要。读者只有通过必要的书面和上机练习,才能掌握本课程的基本方法。

本书由李莉主编。绪论及第 1、第 2 章由张倩编写;第 3、第 4、第 6 章由李莉编写;第 5、第 7 章以及各章的习题和参考答案由俞玉莲编写。

本书集作者在上海师范大学多年课程建设的探索和教学改革的实际经验,是上海市精品课程建设配套教材。本书也可作为相关专业的工程技术人员的参考书。在编写过程中,本书得到了上海师范大学的大力支持,在此表示感谢!

由于编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者不吝指正。

与本书配套的电子教案,读者可在清华大学出版社的网站上免费下载。

编 者

2016 年 5 月

于上海师范大学

目 录

绪论	1
0.1 数字信号处理系统的组成	1
0.2 数字信号处理的特点	2
0.3 数字信号处理学科的内容	3
0.4 数字信号处理的实现	4
0.5 数字信号处理系统的应用领域	5
第 1 章 离散时间信号和系统	6
1.1 概述	6
1.2 时域离散信号	6
1.2.1 模拟信号的采样、序列	6
1.2.2 常用典型序列	7
1.2.3 序列的运算	10
1.3 离散时间系统	13
1.3.1 线性	14
1.3.2 时不变性	15
1.3.3 系统输入输出关系	16
1.3.4 系统的因果性和稳定性	17
1.4 系统的线性常系数差分方程及其求解	19
1.4.1 系统的线性常系数差分方程	19
1.4.2 线性常系数差分方程的求解	20
1.5 模拟信号数字处理方法	22
1.5.1 模拟信号数字处理方法概述	22
1.5.2 数字信号转换成模拟信号	30
1.6 MATLAB 实现	32
1.6.1 常用序列的 MATLAB 实现	32
1.6.2 序列运算的 MATLAB 实现	33
1.6.3 卷积和的 MATLAB 实现	34
1.6.4 MATLAB 求解离散系统的差分方程	35
1.7 习题	35

第2章 离散时间信号和系统的变换域分析	38
2.1 概述	38
2.2 序列的离散时间傅里叶变换	38
2.2.1 离散时间傅里叶变换定义	38
2.2.2 DTFT 的性质	39
2.3 周期序列的离散傅里叶级数与 DTFT	43
2.3.1 周期序列的离散傅里叶级数	43
2.3.2 周期序列的 DTFT	44
2.4 DTFT 和 CFT 之间的关系	46
2.5 z 变换	49
2.5.1 z 变换的定义	49
2.5.2 z 变换的收敛域	50
2.5.3 逆 z 变换	52
2.5.4 z 变换的性质与定理	58
2.5.5 利用 z 变换求数字系统的输出	62
2.6 用 ZT 分析系统的因果性、稳定性和频响特性	64
2.6.1 传输函数与系统函数	64
2.6.2 因果性和稳定性	64
2.6.3 信号频谱/系统频响的几何解释	65
2.7 MATLAB 实现	72
2.7.1 周期序列傅里叶级数的 MATLAB 实现	72
2.7.2 序列逆 z 变换的 MATLAB 实现	73
2.7.3 系统时域响应的 MATLAB 实现	73
2.7.4 系统频率响应的 MATLAB 实现	74
2.8 习题	76
第3章 离散傅里叶变换	78
3.1 引言	78
3.2 DFT 的定义	80
3.2.1 DFT 和 IDFT 的定义	80
3.2.2 DFT 和 z 变换的关系	87
3.2.3 周期序列与有限长序列的内在联系	88
3.3 DFT 的性质	91
3.3.1 线性性质	91
3.3.2 序列的和	91
3.3.3 序列的初值	91
3.3.4 序列的圆周移位(循环移位)	91
3.3.5 圆周卷积(循环卷积)及其与有限长序列线性卷积的关系	94

3.3.6	序列的相关性	99
3.3.7	Parseval 定理	100
3.3.8	有限长序列及其 DFT 的奇偶性和对称性	100
3.4	频域取样	104
3.5	用 DFT 对连续时间信号进行谱分析	107
3.5.1	DFT 是对连续时间信号 FT 的近似	107
3.5.2	频率分辨率	108
3.5.3	DFT 分析连续时间信号 $x(t)$ 实例	109
3.6	用 DFT 对离散时间信号进行谱分析	114
3.7	DFT 应用中的问题与参数选择	115
3.7.1	混叠现象	115
3.7.2	栅栏效应	117
3.7.3	频率泄漏	118
3.8	MATLAB 实现	119
3.8.1	DFT 的 MATLAB 实现	119
3.8.2	用 DFT 计算线性卷积和圆周卷积的 MATLAB 实现	120
3.8.3	连续时间信号谱分析的 MATLAB 实现	121
3.9	习题	122
第 4 章	快速傅里叶变换	126
4.1	概述	126
4.2	基-2 FFT	127
4.2.1	DIT-FFT 原理	127
4.2.2	DIF-FFT	132
4.2.3	快速傅里叶反变换	134
4.3	矩阵形式的 FFT	135
4.3.1	算法原理	135
4.3.2	进一步减少运算量的措施	138
4.4	FFT 应用于长序列卷积	140
4.4.1	快速卷积	140
4.4.2	重叠相加	141
4.4.3	重叠保留	142
4.5	线性调频- z 变换	143
4.5.1	CZT 的定义	144
4.5.2	CZT 的特点	145
4.5.3	CZT 的快速实现	145
4.6	离散哈特莱变换	148
4.6.1	DHT 的定义	149

4.6.2	DHT 和 DFT 的关系	149
4.6.3	DHT 的性质	150
4.7	MATLAB 实现	151
4.8	习题	152
第 5 章	数字滤波器的结构	154
5.1	概述	154
5.2	信号流图表示网络结构	155
5.3	IIR 滤波器的基本网络结构	157
5.3.1	直接型 I	157
5.3.2	直接型 II (典型形式)	159
5.3.3	级联型	162
5.3.4	并联型	164
5.3.5	转置型	165
5.4	FIR 滤波器的基本结构	165
5.5	格型结构	174
5.6	MATLAB 实现	177
5.7	习题	178
第 6 章	IIR 数字滤波器设计	181
6.1	基本概念	181
6.1.1	数字滤波器和模拟滤波器	181
6.1.2	滤波器的指标	181
6.1.3	数字滤波器的设计原则	185
6.2	模拟滤波器的设计	185
6.2.1	模拟 LPF 设计指标	186
6.2.2	巴特沃斯模拟低通滤波器设计	187
6.2.3	切比雪夫模拟低通滤波器设计	191
6.2.4	模拟滤波器的频率变换	195
6.3	IIR LPF 设计: 脉冲响应不变法	200
6.3.1	一般数字滤波器的设计思想	200
6.3.2	脉冲响应不变法的变换思想及方法	201
6.3.3	脉冲响应不变法的参数映射关系及特点	202
6.4	IIR LPF 设计: 双线性变换法	205
6.4.1	双线性变换的一般变换关系	205
6.4.2	间接法设计数字 LPF 时 T 的选择	207
6.4.3	双线性变换法、脉冲响应不变法的比较	207

6.5	IIR HPF、BPF、BSF 设计	207
6.5.1	设计思路	207
6.5.2	频率变换法设计数字高通滤波器	213
6.5.3	z 平面变换法	214
6.6	IIR 滤波器直接设计法	215
6.7	IIR 滤波器设计应用实例(MATLAB 分析)	216
6.7.1	模拟低通滤波器设计	216
6.7.2	模拟-数字滤波器的转换	218
6.7.3	数字滤波器应用实例	221
6.8	习题	224
第 7 章	FIR 滤波器的设计	226
7.1	FIR 滤波器的线性相位条件和特点	226
7.2	窗函数法设计 FIR 滤波器	230
7.2.1	窗函数技术	230
7.2.2	窗函数法的应用	236
7.3	频率取样法设计 FIR 滤波器	242
7.4	优化技术设计	247
7.4.1	优化准则	247
7.4.2	线性相位 FIR 滤波器的 Chebyshev 最优逼近	248
7.5	IIR 和 FIR 滤波器的比较	253
7.6	FIR 滤波器的 MATLAB 仿真实现	255
7.6.1	窗函数法设计 FIR 滤波器的实现	255
7.6.2	频率取样法设计 FIR 滤波器的实现	256
7.6.3	FIR 滤波器的优化设计的实现	257
7.6.4	信道均衡器的 FIR 滤波器的实现	257
7.7	习题	258
参考答案		261
参考文献		272

绪 论

数字信号处理是 20 世纪 60 年代,随着信息学科和计算机学科的高速发展而迅速发展起来的一门新兴学科。它的重要性日益在各个领域的应用中表现出来。

数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP),是把信号用数字或符号表示成序列,通过计算机或通用(专用)信号处理设备,用数值计算方法进行各种处理,达到提取有用信息便于应用的目的,例如滤波、检测、变换、增强、估计、识别、参数提取、频谱分析等。

关于 DSP:可以狭义理解为 Digital Signal Processor(数字信号处理器)。广义上也可以理解为 Digital Signal Processing(数字信号处理技术)。本书讨论的 DSP 的概念是指广义上的理解。

0.1 数字信号处理系统的组成

信号(Signal)是一种物理体现,或是传递信息的函数。而信息是信号的具体内容。

模拟信号:指在给定的连续时间段内,幅度可以是任意的连续值的信号。

连续时间信号:指在给定的连续时间段内,幅度可以是不连续值的信号。如阶梯波。

离散时间信号:指在给定的一组离散时间下,表示信号的数值的函数。也称为取样信号或取样序列。

数字信号:指时间和幅度都经过“量化”的信号。

数学上,数字信号(函数)的变量和各变量对应的函数值是一组离散的数值;形式上,这些离散的数值常用有限位数的码表示。如用 3 位二进制码可表示整数变量值 0~7,4 位二进制码可表示 15 个数值不同的非零离散幅度值。数字信号可用一序列的数表示,而序列中的每个数又可表示为二进制码的形式,适合计算机处理。

系统:指反映或表示信号处理输入输出(I/O)关系的器件或运算的物理设备。或者说,凡是能将信号加以变换以达到人们要求的各种设备。一般可分为模拟系统与数字系统。

模拟系统:其输入输出信号为模拟信号,可反映模拟信号的 I/O 关系。

数字系统:其输入输出信号为数字信号,可反映数字信号的 I/O 关系。

图 0.1 显示了数字信号处理系统的基本组成,由图 0.1 可见,系统首先把模拟信号变换成数字信号,之后用数字技术进行处理,然后再还原成模拟信号。

图 0.1 所示系统里“数字信号处理器”模块中最基本的核心内容为数字滤波器和快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)算法。工程应用中,充分利用数字技术的优势,可以实现信号调制,滤波,正交变换,信号检测等各种功能的数字信号处理系统的分析和设计理论、算法,习惯上称为“数字信号处理”。

实际数字信号处理系统并不一定要包括图 0.1 所示的所有组成模块,例如有的系统只



图 0.1 数字信号处理系统的基本组成

需数字输出,则不需要数模转换器(D/A 变换器)和后面的模拟滤波器。

例 0.1 单边带(Single Side Band,SSB)信号的数字技术实现。

图 0.2 给出了一个无线通信发射机中常见的射频上单边带信号的实现原理框图,是把输入的低频信号的频谱,通过调制技术搬到载波频率 Ω_c 的附近,最后通过带通滤波器(Band-Pass Filter,BPF)仅输出射频上单边带信号,以提高频谱效率。

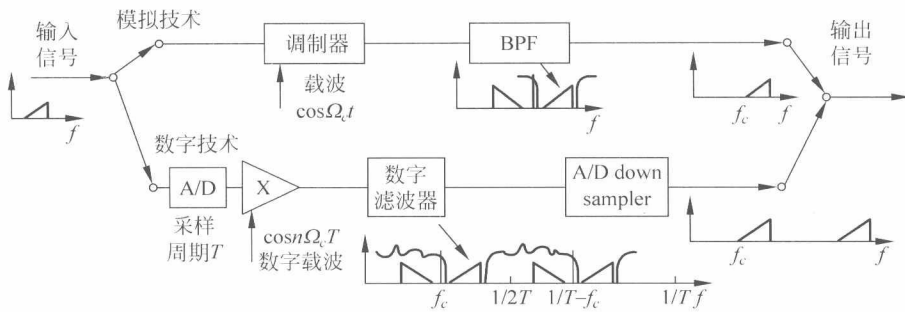


图 0.2 例 0.1 单边带(SSB)信号的技术实现比较

图 0.2 中上面的支路是模拟发射机 SSB 信号的产生方式,下面的支路是数字发射机中 SSB 信号的产生方式。对比这两种产生方式输出的 SSB 信号的频谱可知:数字技术生成的 SSB 信号的谱是周期谱,而模拟技术产生的 SSB 信号谱不是周期的。这个特征差异,读者学习本书后续内容后,可以直接分析验证。

0.2 数字信号处理的特点

多数科学和工程中遇到的信号都是模拟信号,以前的信号与系统领域都是研究模拟信号处理的理论和实现的。

模拟信号处理的缺点是:难以做到高精度,受环境影响较大,可靠性差且不灵活等。

由于数字信号处理的直接对象是数字信号,处理的方式是数值运算的方式,因此相对于模拟信号处理具有许多优点。

1. 灵活性强

数字信号处理系统的性能取决于系统的参数,这些参数储存在存储器中,很容易改变,因此容易改变系统的性能,如可以方便地调整处理器的系数实现自适应滤波等,甚至得到实现完全不同功能的系统。数字系统的改变可以通过在线完成,从而实现一个系统多种用途。相比之下,改变模拟系统的参数要困难得多。而数字系统的时分复用可以灵活地分时处理

几路信号,共享处理器。

2. 高精度性和稳定性

组成模拟系统的元器件,如电阻器、电容器等都有一定的温度系数,易受周围环境的温度及噪声的影响。数字系统多由半导体器件组成的开关电路实现,只有 0 和 1 两个信号电平,不易随使用条件变化而变化,尤其是使用了超大规模集成的 DSP 芯片,简化了数字系统设备,更提高了系统的稳定性和可靠性,数字运算位数也由 8 位提高到现在的 16 位、32 位、64 位甚至更高,达到了模拟系统无法比拟的计算精度。

3. 便于大规模集成

数字器件具有高度的规范性,对电路参数要求不严,对元件值的误差容限不敏感,受使用温度、所处环境等外部参数影响较小,容易大规模集成和大规模生产。采用大规模集成电路后,数字系统远比同样功能的模拟系统体积小、重量轻、可靠性强。

4. 对数字信号可以存储、传输、处理

数字信号便于存储、传输,可以进行加密、编码等数字化处理,可实现模拟系统处理不能实现的功能:如实现信号的线性相位、多抽样率处理、级联、易于存储等,还可以进行二维与多维处理。

数字信号处理也有缺点:如需要模数转换;受采样频率的限制,处理信号频率范围有限;数字系统由耗电的有源器件构成,能耗问题是制约其性能提升的瓶颈。

但是数字信号处理的优点远远超过其缺点,随着大规模集成电路以及数字计算机的飞速发展,加之从 20 世纪 60 年代末以来数字信号处理理论和技术的成熟和完善,用数字方法来处理信号,即数字信号处理,已逐渐取代模拟信号处理。

随着信息时代、数字世界的到来,数字信号处理已成为一门极其重要的学科和技术领域。

0.3 数字信号处理学科的内容

在国际上一般把 1965 年由 Cooley-Turkey 提出的快速傅里叶变换(FFT)的问世,作为数字信号处理这一学科的开端。而它的历史可以追溯到 17 世纪至 18 世纪,即牛顿和高斯的时代。通过 FFT 算法,数字信号处理以软件形式,通过计算机实现数字滤波,那个时代数字信号处理的特点是通用、灵活、速度慢。

1980 年前后,大规模集成(Large-Scale Integration, LSI)技术高速发展,可用多个集成电路(Integrated Circuit, IC)芯片(数字加法器、数字乘法器、延迟器等)硬件实现数字滤波,相对软件形式而言,具有速度快、实时处理的优点。

学习数字信号处理课程需要的基本数学工具有:微积分、概率统计、随机过程、高等代数、数值分析、近代代数、复杂函数。而离散时间线性变换(Linear Time Invariant, LTI)系统理论,离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)是数字信号处理的理论基础。

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,成为人工智能、模式识别、神经网络、数字通信等新兴学科的理论基础。

数字信号处理学科的主要内容如下所示。

- 信号的采集:包括模拟/数字(A/D)转换技术、数字/模拟(D/A)转换技术、抽样定理、量化噪声理论等。
- 离散信号分析:离散时间信号时域及频域分析、离散傅里叶变换(DFT)理论。
- 离散系统分析。
- 信号处理的快速算法:谱分析与快速傅里叶变换(FFT),快速卷积与相关算法。
- 滤波技术。
- 信号的估计:各种估值理论、相关函数与功率谱估计。
- 信号的压缩:包括语音信号与图像信号的压缩。
- 信号的建模:包括自回归(Auto-Regressive, AR)模型、滑动平均(Moving Average, MA)模型、自回归滑动平均(Auto-Regressive and Moving Average, ARMA)模型等各种模型。
- 其他特殊算法:同态处理、抽取与内插、信号重建等。
- 数字信号处理的实现。
- 数字信号处理的应用。

0.4 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,用数值计算的方法对信号进行处理(运算),通过数字的相加、加权乘和延时时对信号波形进行变换。把原输入信号变换成所希望的信号,如:滤波、均衡、放大、噪声消除、信号产生、检测、运算、参量提取等。

因此,数字信号处理的实现方法不同于模拟信号处理的实现方法。数字信号处理基本上可以分成两大类实现方法,即软件实现方法和硬件实现方法。

软件实现方法:按原理和方法编程序在通用计算机上实现。

硬件实现方法:按要求和算法,设计硬件结构图,用数字乘法器、数字加法器、延时器、控制器、存储器,I/O接口等实现。

数字信号处理的实现分别有以下几种方案。

(1) 采用大、中、小型计算机和微机:工作站和微机上各厂家的数字信号软件,如有各种图像压缩和解压软件。

(2) 用单片机:可根据不同环境配不同单片机,其能达到实时控制,但数据运算量不能太大。

(3) 利用通用 DSP 芯片: DSP 芯片较之单片机有着更为突出的优点。如内部带有乘法器、累加器,采用流水线工作方式及并行结构,多总线带来的高速度。配有适于信号处理的指令(如 FFT 指令)等。美国德州仪器公司(TI)、Analog Devices、Lucent、Motorola、AT&T 等公司都生产 DSP 芯片。

(4) 利用特殊用途的 DSP 芯片:市场上推出了专门用于实现 FFT、有限脉冲响应

(Finite Impulse Response, FIR)数字滤波器、卷积、相关等专用数字芯片。其软件算法已在芯片内部用硬件电路实现,使用者只需给出输入数据,便可在输出端直接得到所需数据。

用通用的可编程的数字信号处理器实现方案是目前重要的数字信号处理实现方法,它既有硬件实现方法实时的优点,又具有软件实现方法的灵活性优点。

0.5 数字信号处理系统的应用领域

数字信号处理在信息时代所发挥的作用远超过一般人的想象,可以说,没有数字信号处理技术,现代社会的技术发展和给生活带来的便利将大打折扣,甚至无法实现。

数字信号处理大致可分为:信号分析和信号滤波。

信号分析涉及信号特性的测量。它通常是一个频域的运算。主要应用于谱(频率和/或相位)分析、语音分析和识别、目标检测等领域。例如对环境噪声的谱分析,可确定主要频率成分,了解噪声的成因,找出降低噪声的对策;对振动信号的谱分析,可了解振动物体的特性,为设计或故障诊断提供资料和数据;对于高保真音乐和电视这样的宽带信号转到频率域后,因信号中绝大多数能量集中在直流和低频部分,就可把信号频谱中的大部分较高频率成分滤去,从而压缩信号频带。

数字滤波就是在形形色色的信号中提取所需要的信号,抑制不需要的信号或干扰信号。例如消除信息在传输过程中由于信道不理想所引起的失真,滤除不需要的背景噪声,去除干扰,频带分割,信号谱的成形。

数字信号处理广泛地应用于数字通信、雷达、遥感、声呐、语音合成、图像处理、测量与控制、高清晰度电视、多媒体物理学、生物医学、机器人、地球物理、地质勘探、航空航天等领域,并有效地推动了众多工程技术领域的技术进步和学科发展。

综上所述,数字信号处理是一门涉及众多学科,又应用于众多领域的新技术和新兴学科。

第 1 章 离散时间信号和系统

1.1 概述

信号通常是一个自变量或几个自变量的函数。如果仅有一个自变量,则称为一维信号;如果有两个以上的自变量,则称为多维信号。本书仅研究一维数字信号处理的理论与技术。关于信号的自变量,有多种形式,可以是时间、距离、温度、电压等,不失一般地,本书把信号看作时间的函数。

大多数离散时间信号可通过对连续信号抽样得到,但目前随着新型传感器的发展,直接采集数字信号也是可能的,如数码相机中的镜头由电容耦合器件(Charge-Coupled Device, CCD)构成,就直接采集到了数字图像信号。

在本书中主要研究数字信号。数字信号是信号的函数值被量化、并用一定比特的编码表示的时域离散信号,如数字序列 $x(n)$ 可表示一个数字信号。

本章作为全书的基础,主要介绍时域离散信号的表示方法和典型信号、线性时不变系统的因果性和稳定性,学习数字系统的输入输出描述法,线性常系数差分方程的解法等。最后介绍模拟信号数字处理方法(采样和重构的问题)。

1.2 时域离散信号

1.2.1 模拟信号的采样、序列

对模拟信号 $x_a(t)$,在时刻 $t=nT$ 进行采样,采样间隔为 T ,采样输出就是时域离散信号,如式(1.2.1)

$$x(n) \equiv x_a(nT) = x_a(t) |_{t=nT}, \quad -\infty < n < \infty \quad (1.2.1)$$

式(1.2.1)中, n 是采样信号的顺序号,是整数,无量纲。

$x_a(nT)$ 是一个有序的数字序列: $\dots, x_a(-T), x_a(0), x_a(T), \dots$, 该数字序列就是时域离散信号。实际数字信号处理中,这些数字序列值按顺序放在存储器中,此时 nT 代表的是前后顺序。为简化,采样时间间隔 T 可以不写,简记为 $x(n)$ 信号, $x(n)$ 亦可简称为序列。对于具体信号, $x(n)$ 也代表第 n 个序列值。序列的值等于模拟信号 $x_a(t)$ 的抽样值,可以有量纲。

时域离散信号随 n 的变化规律可以用公式表示,也可以用图形表示。如果 $x(n)$ 是通过观测得到的一组离散数据,则其可以用数值集合表示,如式(1.2.2)所示

$$x(n) = \{\dots, -0.1, 1, 4.5, 3.4, 0.9, \dots\} \quad (1.2.2)$$