



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



数字信号处理

(第三版)

高西全 丁玉美 编著

导航、
制导与
控制



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

数字信号处理

（第二版）

程佩青 主编

清华大学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

数字信号处理

(第三版)

高西全 丁玉美 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书是2001年出版的全国统编教材《数字信号处理(第二版)》的修订版。本次修订保持了原教材的结构和风格,根据普通大学本科生教学大纲要求选材,系统地讲解数字信号处理的基本原理、基本概念与基本分析方法。

全书共10章(不含绪论部分),分别为时域离散信号和时域离散系统、时域离散信号和系统的频域分析、离散傅里叶变换(DFT)、快速傅里叶变换(FFT)、时域离散系统的网络结构、无限脉冲响应数字滤波器的设计、有限脉冲响应数字滤波器的设计、多采样率数字信号处理、数字信号处理的实现、上机实验(含五个基础理论实验和一个综合应用实验)。

为了教授本书的教师方便教学以及有助于使用本教材的学生进行上机仿真实验,这次修订时,特意在前8章中,结合各章内容,介绍了相应的MATLAB信号处理工具箱函数,并给出了书中部分插图的绘图程序和大部分例题的求解程序。

本书适合作为普通高等学校电子信息类专业和相近专业的本科生和工程硕士研究生的教材以及非电子信息类专业硕士研究生教材,也可以作为科技人员的参考书,亦可作为大专生的选用教材。

为了便于教与学,本书的学习指导书随后出版,书中含有习题参考解答。

★本书配有电子教案,需要的教师可与出版社联系,免费提供。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理/高西全,丁玉美编著. —3版.

—西安:西安电子科技大学出版社,2008.8(2009.3重印)

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5606-0922-5

I. 数… II. ①高… ②丁… 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(2008)第102676号

责任编辑 夏大平

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2008年8月第3版 2009年3月第30次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 20

字 数 472千字

印 数 253 001~261 000册

定 价 29.00元

ISBN 978-7-5606-0922-5/TN·0160

XDUP 1193023 - 30

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

随着信息科学和计算技术的迅速发展,数字信号处理的理论与应用得到飞跃式发展,形成一门极其重要的学科。数字信号处理也已经成为高等学校相关专业的必修课程,目前对该课程的教学内容、教学方法和仿真实验工具又提出了新的要求。

1994年我们中标编写出版了全国统编教材《数字信号处理》,2001年编写出版了该书的第二版。本书的主要特点是满足普通大学教学大纲要求,选材少而精,并配有成熟的实验与习题,是一本适合教与学的较好教材,被国内数十所大学选用,先后印刷27次,销售量逾24万册。本书2002年9月获第五届全国高校出版社优秀畅销书一等奖,2005年获陕西省高校优秀教材一等奖。

为了适应数字信号处理新理论与新技术的发展,使数字信号处理教材与国际接轨,满足普通大学教学的需要,我们对第二版进行了适当修订。我们的修订思想和修订内容如下:

1. 保持原书编写风格,突出基本原理、基本概念与基本分析方法,选材精练。

随着科学技术的发展,数字信号处理的新内容很多,但本科阶段主要是培养学生学习知识、分析问题和解决问题的能力,而不是灌输大量的具体知识和技术。培养这些能力的主要途径是:打好理论基础,掌握本学科的基本原理、基本概念与基本分析方法,了解并学会使用现代设计、分析、开发、仿真与实验工具。所以,教材选材必须少而精,使学生在很有限的课时内,通过学习、思考和仿真实验,掌握基本知识。

2. 根据第二版教材的教学实践情况,删去了一些因课时受限而课堂一般不教授的内容。但基本教学内容不变,以便使原来使用本教材的教师熟悉新教材。

(1) 本教材中重点介绍快速傅里叶变换(FFT)的基本思想,以基2FFT为例介绍减少运算量的途径,估计FFT算法的运算效率,归纳运算规律,最后给出编程框图,使学生对一种FFT从基本理论到计算机实现建立完整的概念。删掉分裂基FFT和离散哈德莱变换(DHT)的内容。从进一步减少运算量的角度,介绍FFT和FHT(快速DHT)这两种快速算法和其他快速算法的优缺点,开阔学生的视野,指导学生根据实际需求选择FFT算法。

(2) 删掉状态变量分析法。

(3) 硬件实现部分删除了专用硬件芯片实现和DSP实现等介绍硬件的具体内容,这些内容对于本科大学三年级的学生来说,仅靠听几节课是不可能接受的。所以,只简要介绍专用硬件实现和软硬结合实现的概念,以及常用芯片种类及其特点。

3. 增加或补充新的内容和新的分析方法。

(1) 近几年多采样率数字信号处理广泛应用于通信与信号处理领域,为此,本书进

一步加强了多采样率数字信号处理的内容，将原书 8.4 节改为第 8 章，主要讲授多采样率数字信号处理的基本原理、采样率变换系统的实现方法和高效实现网络结构等。在原内容的基础上，增加了常用的多相实现结构，并简要介绍了多级实现的优点。

(2) 序列循环卷积引入适合计算机编程的矩阵算法。

(3) 重新编写了滤波器的频率变换内容，主要介绍频率变换和高通、带通和带阻滤波器设计的概念，规范了其中的符号和频率变换公式，并引入直接调用 MATLAB 滤波器设计函数直接设计各种滤波器的方法。

(4) 增加了两个实验，其中有一个综合应用实验。

4. 将数字信号处理的基础理论、滤波器分析设计等与 MATLAB 进行适当的结合。

美国 MathWork 公司推出的 MATLAB 是当前最优秀的科技应用软件之一，早在 20 世纪 90 年代就已成为国际公认的信号处理标准软件和仿真开发平台。国外近几年出版的数字信号处理的优秀教材或者参考书，没有一本不使用 MATLAB 的。利用 MATLAB 可以使一些很难理解的抽象理论得到直观演示解释，解决各种复杂问题的分析与计算等难题。

本书各章的基本原理，均使用 MATLAB 释疑与实现。这样一来，使复杂的数字滤波器分析与设计的繁杂计算问题，变成了学生易接受、易实现的简单问题。

但是本书的主要内容仍然是数字信号处理的基本原理和基本分析方法，因此本书主要结合例题和习题介绍一些 MATLAB 信号处理工具箱函数和程序。本书所有程序尽可能调用 MATLAB 信号处理工具箱函数解决问题，力求程序简单易读，从而保证了以基本理论为主线，以 MATLAB 作为学习理论的工具。这样既避免了有些作者将数字信号处理教材写成 MATLAB 编程教材的喧宾夺主的现象，又能使读者利用风靡世界的 MATLAB 软件进行高效的上机实验、设计与仿真。

第 1~8 章都结合基本内容，介绍了相应的 MATLAB 信号处理工具箱函数，并给出理论仿真和例题求解程序及运行结果。第 1~8 章章末配有习题与上机题，题号带有“*”的为上机题。上机题由授课教师根据具体教学情况适当选用。

为了便于读者学习，附录 A 给出了用 Masson 公式求网络传输函数 $H(z)$ 的过程，附录 B 给出了 MATLAB 信号处理工具箱函数索引表。

本书第 1、2、5、9 章由丁玉美编写，第 10 章由丁玉美和高西全共同编写，其余各章及附录由高西全编写。

本书的先修课程是“工程数学”、“信号与系统”、“数字电路”、“微机原理”和“MATLAB 语言”等。如果学生没有 MATLAB 基础，或教学过程中未讲述有关 MATLAB 的内容，则跳过书中所有 MATLAB 内容，本书仍自成体系，是一本完整的教材，不影响教学和阅读学习。

本书参考教学时数为 60 学时。如果在“信号与系统”课程中已讲授本书第 1 章和第 2 章的内容，则教学时数可减少到 46 学时。第 8 章中多相滤波器结构较难讲解，如果课时数紧张，可以不讲，但要向学生说明这种实现结构在实际中的重要性。对大专学生，可以只讲前 8 章，参考学时数为 60 学时。对非电子信息类专业硕士研究生，参考

学时数为 46 学时。

本书在编写构思和选材过程中，参考了书后所列参考文献的一些编写思想，采用了其中一些内容、例题和习题，在此向这些文献的作者表示诚挚的感谢！

本书的出版得到西安电子科技大学出版社梁家新社长和夏大平编辑的大力支持，在此深表感谢！

为了便于教师授课和师生上机仿真实验，本书作者免费提供本书完整的程序集。具体办法是：由任课教师通过电子邮件向作者索取，或登录西安电子科技大学出版社网站(网站地址见版权页)下载。

由于作者水平所限，书中难免有不足之处，欢迎广大读者批评指正。欢迎读者反馈宝贵建议和意见，交流教学体会和经验，以便我们不断修正错误，汲取经验，使本教材进一步完善和提高。

本书第一作者联系电话：(029)88202853

电子邮件地址：xqgao@mail.xidian.edu.cn

编著者
于西安电子科技大学
2008 年 5 月

第二版前言

本教材系按原电子工业部的《1996~2000 全国电子信息类专业教材编审出版规划》，由通信与信息工程专业教学指导委员会编审、推荐出版的。本教材由西安电子科技大学丁玉美担任主编。

本教材主要内容分成三部分，第一部分包括第一、二、三、四章，是数字信号处理的基础理论部分。第一章学习时域离散信号和系统的描述方法、线性常系数差分方程以及模拟信号数字处理方法；第二、三章学习三个重要的数学变换工具：序列的傅里叶变换(FT)、Z 变换、离散傅里叶变换(DFT)，以及用它们对时域离散信号和系统进行频域分析的方法；第四章介绍 FFT，它只是 DFT 的一种快速算法。第二部分包括第五、六、七、八章，主要学习数字滤波器的基本理论和设计方法，包括 IIR 数字滤波器、FIR 数字滤波器、几种特殊数字滤波器，以及网络结构和状态变量分析法。关于模拟滤波器的设计方法，不属于本书的内容，但它是设计 IIR 数字滤波器的基础，考虑到学生的基本课程中一般不介绍这部分内容，为了让学生真正地掌握数字滤波器设计方法，将这部分内容放在正文中。第三部分包括第九、十章，是数字信号处理的技术实现，包括软、硬件实现方法、实现中的量化误差，以及本书的全部上机实验。上机实验部分可以按照实验内容适当分配到各章中进行。

本书先修课是信号与系统、工程数学等，书中有些内容，如差分方程、Z 变换等，可以根据学生的已有基础情况，作适当的省略或者补充。

本书的参考学时数为 60 学时，如学时不够，建议只讲解前七章。前七章中的前三章是必学内容，FFT 仅作为 DFT 的快速算法，只学习其基本原理和用法，其它状态变量分析法、分裂基 FFT 算法、离散哈特莱变换(DHT)、IIR 数字滤波器的直接设计法、利用切比雪夫逼近法设计 FIR 滤波器等可以不讲，或者作为选修内容。

本书是在 1994 年编写的《数字信号处理》(全国统编教材)的基础上重新修订的。全书条理清楚，深入浅出，便于教学和自学。修订后的教材比原教材更加突出了基本概念和基本理论；加强了实践环节，例题和习题增多，尤其增加了数字信号处理的软、硬件实现方法，更加突出了理论和实践相结合的环节；由于计算机的迅速发展，去掉了实际应用中已不重要的有限寄存器长度效应部分，仅将重要的量化误差概念放在第九章中介绍。为了方便读者学习，与本书配套将同时出版《数字信号处理学习指导》一书。

本教材由高西全编写第三、四、八、九、十章，其它由丁玉美编写，樊来耀为本书提出了许多宝贵意见，在此表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

作者

2000 年 10 月

目 录

绪论	1
第 1 章 时域离散信号和时域离散系统	4
1.1 引言	4
1.2 时域离散信号	5
1.2.1 常用的典型序列	6
1.2.2 序列的运算	9
1.3 时域离散系统	10
1.3.1 线性系统	10
1.3.2 时不变系统	11
1.3.3 线性时不变系统输入与输出之间的关系	11
1.3.4 系统的因果性和稳定性	16
1.4 时域离散系统的输入输出描述法——线性常系数差分方程	18
1.4.1 线性常系数差分方程	18
1.4.2 线性常系数差分方程的求解	19
1.5 模拟信号数字处理方法	21
1.5.1 采样定理及 A/D 变换器	22
1.5.2 将数字信号转换成模拟信号	25
习题与上机题	29
第 2 章 时域离散信号和系统的频域分析	33
2.1 引言	33
2.2 时域离散信号的傅里叶变换的定义及性质	33
2.2.1 时域离散信号傅里叶变换的定义	33
2.2.2 时域离散信号傅里叶变换的性质	34
2.3 周期序列的离散傅里叶级数及傅里叶变换表示式	40
2.3.1 周期序列的离散傅里叶级数	40
2.3.2 周期序列的傅里叶变换表示式	42
2.4 时域离散信号的傅里叶变换与模拟信号傅里叶变换之间的关系	45
2.5 序列的 Z 变换	46
2.5.1 Z 变换的定义	46
2.5.2 序列特性对收敛域的影响	47
2.5.3 逆 Z 变换	50
2.5.4 Z 变换的性质和定理	54
2.5.5 利用 Z 变换解差分方程	59
2.6 利用 Z 变换分析信号和系统的频响特性	61
2.6.1 频率响应函数与系统函数	61
2.6.2 用系统函数的极点分布分析系统的因果性和稳定性	62

2.6.3	利用系统的极零点分布分析系统的频率响应特性	63
2.6.4	几种特殊系统的系统函数及其特点	67
	习题与上机题	71
第3章	离散傅里叶变换(DFT)	75
3.1	离散傅里叶变换的定义及物理意义	75
3.1.1	DFT的定义	75
3.1.2	DFT与傅里叶变换和Z变换的关系	76
3.1.3	DFT的隐含周期性	77
3.1.4	用MATLAB计算序列的DFT	78
3.2	离散傅里叶变换的基本性质	79
3.2.1	线性性质	79
3.2.2	循环移位性质	80
3.2.3	循环卷积定理	81
3.2.4	复共轭序列的DFT	84
3.2.5	DFT的共轭对称性	84
3.3	频率域采样	87
3.4	DFT的应用举例	90
3.4.1	用DFT计算线性卷积	90
3.4.2	用DFT对信号进行谱分析	95
	习题与上机题	105
第4章	快速傅里叶变换(FFT)	110
4.1	引言	110
4.2	基2FFT算法	110
4.2.1	直接计算DFT的特点及减少运算量的基本途径	110
4.2.2	时域抽取法基2FFT基本原理	111
4.2.3	DIT-FFT算法与直接计算DFT运算量的比较	114
4.2.4	DIT-FFT的运算规律及编程思想	115
4.2.5	频域抽取法FFT(DIF-FFT)	118
4.2.6	IDFT的高效算法	121
4.3	进一步减少运算量的措施	121
4.3.1	多类蝶形单元运算	121
4.3.2	旋转因子的生成	122
4.3.3	实序列的FFT算法	122
4.4	其他快速算法简介	123
	习题与上机题	125
第5章	时域离散系统的网络结构	126
5.1	引言	126
5.2	用信号流图表示网络结构	126
5.3	无限长脉冲响应基本网络结构	128
5.4	有限长脉冲响应基本网络结构	133
5.5	线性相位结构	134
5.6	频率采样结构	135

5.7 格型网络结构	138
5.7.1 全零点格型网络结构	138
5.7.2 全极点格型网络结构	141
习题与上机题	144
第 6 章 无限脉冲响应数字滤波器的设计	149
6.1 数字滤波器的基本概念	149
6.2 模拟滤波器的设计	153
6.2.1 模拟低通滤波器的设计指标及逼近方法	153
6.2.2 巴特沃斯低通滤波器的设计	155
6.2.3 切比雪夫滤波器的设计	161
6.2.4 椭圆滤波器的设计	168
6.2.5 五种类型模拟滤波器的比较	170
6.2.6 频率变换与模拟高通、带通、带阻滤波器的设计	170
6.3 用脉冲响应不变法设计 IIR 数字低通滤波器	177
6.4 用双线性变换法设计 IIR 数字低通滤波器	184
6.5 数字高通、带通和带阻滤波器的设计	189
习题与上机题	193
第 7 章 有限脉冲响应数字滤波器的设计	196
7.1 线性相位 FIR 数字滤波器的条件和特点	196
7.2 利用窗函数法设计 FIR 滤波器	202
7.2.1 窗函数法设计原理	202
7.2.2 典型窗函数介绍	206
7.2.3 用窗函数法设计 FIR 滤波器的步骤	211
7.2.4 窗函数法的 MATLAB 设计函数简介	213
7.3 利用频率采样法设计 FIR 滤波器	217
7.4 利用等波纹最佳逼近法设计 FIR 数字滤波器	223
7.4.1 等波纹最佳逼近法的基本思想	223
7.4.2 remez 和 remezord 函数及滤波器设计指标	225
7.5 IIR 和 FIR 数字滤波器的比较	229
7.6 几种特殊类型滤波器简介	230
7.7 滤波器分析设计工具 FDATool	230
习题与上机题	235
第 8 章 多采样率数字信号处理	239
8.1 引言	239
8.2 信号的整数倍抽取	240
8.3 信号的整数倍内插	245
8.4 按有理数因子 I/D 的采样率转换	249
8.5 整数倍抽取和内插在数字语音系统中的应用	250
8.5.1 数字语音系统中的信号采样过程及其存在的问题	250
8.5.2 数字语音系统中改进的 A/D 转换方案	251
8.5.3 接收端 D/A 转换器的改进方案	253
8.6 采样率转换滤波器的高效实现方法	254

8.6.1 直接型 FIR 滤波器结构	254
8.6.2 多相滤波器结构	258
8.7 采样率转换器的 MATLAB 实现	261
习题与上机题	263
第 9 章 数字信号处理的实现	265
9.1 数字信号处理中的量化效应	265
9.1.1 量化及量化误差	265
9.1.2 A/D 变换器中的量化效应	267
9.1.3 数字系统中的系数量化效应	268
9.1.4 数字系统中的运算量化效应	271
9.2 数字信号处理技术的软件实现	278
9.3 数字信号处理的硬件实现简介	282
第 10 章 上机实验	284
10.1 实验一：系统响应及系统稳定性	284
10.2 实验二：时域采样与频域采样	286
10.3 实验三：用 FFT 对信号作频谱分析	288
10.4 实验四：IIR 数字滤波器设计及软件实现	290
10.5 实验五：FIR 数字滤波器设计与软件实现	293
10.6 实验六：数字信号处理在双音多频拨号系统中的应用	295
附录	301
附录 A 用 Masson 公式求网络传输函数 $H(z)$	301
附录 B MATLAB 信号处理工具箱函数索引表	302
参考文献	309

绪 论

1. 数字信号处理的基本概念

几乎在所有的工程技术领域中都会涉及到信号处理问题,其信号表现形式有电、磁、机械以及热、光、声等。信号处理一般包括数据采集以及对信号进行分析、变换、综合、估值与识别等。这里的信号类别有4种:第1种是连续信号(即模拟信号),它的幅度和时间都取连续变量;第2种是时域离散信号,其幅度取连续变量,而时间取离散值;第3种是幅度离散信号,其时间变量取连续值,幅度取离散值,如振幅键控信号;第4种是数字信号,它的幅度和时间都取离散值。一般来说,数字信号处理的对象是数字信号,模拟信号处理的对象是模拟信号。但是,如果系统中增加数/模转换器和模/数转换器,那么,数字信号处理系统也可以处理模拟信号。这里关键的问题是两种信号处理系统对信号处理的方式不同,数字信号处理是采用数值计算的方法完成对信号的处理,而模拟信号处理则是通过一些模拟器件,例如晶体管、运算放大器、电阻、电容、电感等,完成对信号的处理。例如,图0.0.1(a)所示的是一个简单的模拟高通滤波器,它是由电阻 R 和电容 C 组成的,而图0.0.1(b)所示的则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。因此,简单地说,数字信号处理就是用数值计算的方法对信号进行处理,这里“处理”的实质是“运算”,处理对象则包括模拟信号和数字信号。

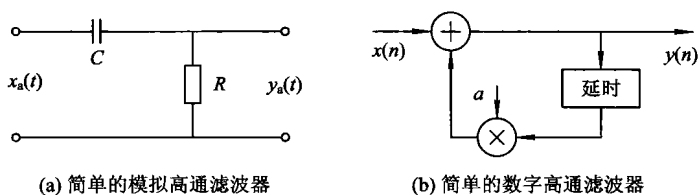


图 0.0.1 高通滤波器简型

2. 数字信号处理的实现方法

数字信号处理的主要对象是数字信号,且是采用数值运算的方法达到处理目的的。因此,其实现方法不同于模拟信号的实现方法,基本上可以分成两种,即软件实现方法和硬件实现方法。软件实现方法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等基本部件实现的一种方法。显然,软件实现灵活,只要改变程序中的有关参数,例如只要改变图0.0.1(b)中的参数 a ,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,这种方法适合于算法研究和仿真。硬件实现运算速度快,可以达到实时处理要求,但是不灵活。

用单片机实现的方法属于软硬结合实现,现在单片机发展很快,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,这种方法适用于数字控制等。采用专用的数字信号处理芯片(DSP 芯片)是目前发展最快、应用最广的一种方法。因为 DSP 芯片比通用单片机有更为突出的优点,它结合了数字信号处理的特点,内部配有乘法器和累加器,结构上采用了流水线工作方式以及并行结构、多总线,且配有适合数字信号处理的指令,是一类可实现高速运算的微处理器。DSP 芯片已由最初的 8 位发展为 16 位、32 位,且性能优良的高速 DSP 不断面市,价格也在不断下降。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实现方法。

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软件实现和硬件实现两大类。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。对于更高速的实时系统,DSP 的速度也不满足要求时,应采用可编程超大规模器件或开发专用芯片来实现。

3. 数字信号处理的特点

由于数字信号处理是用数值运算的方式实现对信号的处理的,因此,相对模拟信号处理,数字信号处理主要有以下优点:

1) 灵活性

数字信号处理系统(简称数字系统)的性能取决于系统参数,这些参数存储在存储器中,很容易改变,因此系统的性能容易改变,甚至通过参数的改变,系统可以变成各种完全不同的系统。灵活性还表现在数字系统可以分时复用,用一套数字系统分时处理几路信号。数字系统可以实现智能系统的功能,可以根据环境条件、用户需求,自动选择最佳的处理算法,例如,软件无线电等。软件无线电的基本思想就是:将宽带 A/D 变换器及 D/A 变换器尽可能地靠近射频天线,建立一个具有“A/D - DSP - D/A”模型的通用的、开放的硬件平台,在这个硬件平台上尽量利用软件技术来实现电台的各种功能模块。例如,通过可编程数字滤波器对信道进行分离;使用数字信号处理器(DSP)技术,通过软件编程来实现通信频段的选择以及完成传送信息抽样、量化、编码/解码、运算处理和变换等;通过软件编程实现不同的信道调制方式的选择,如调幅、调频、单边带、跳频和扩频等;通过软件编程实现不同的保密结构、网络协议和控制终端功能等。

2) 高精度和高稳定性

数字系统的特性不易随使用条件变化而变化,尤其使用了超大规模集成的 DSP 芯片,使设备简化,进一步提高了系统的稳定性和可靠性。运算位数又由 8 位提高到 16、32 位,在计算精度方面,模拟系统是不能和数字系统相比拟的,为此,许多测量仪器为满足高精度的要求只能采用数字系统。

3) 便于大规模集成

数字部件具有高度的规范性,对电路参数要求不严,容易大规模集成和大规模生产,价格不断降低,这也是 DSP 芯片和超大规模可编程器件发展迅速的主要因素之一。由于采用了大规模集成电路,数字系统体积小、重量轻、可靠性强。

4) 可以实现模拟系统无法实现的诸多功能

数字信号可以存储,数字系统可以进行各种复杂的变换和运算。这一优点更加使数字

信号处理不再仅仅限于对模拟系统的逼近，它可以实现模拟系统无法实现的诸多功能。例如，电视系统中的画中画、多画面以及各种视频特技，包括画面压缩、画面放大、画面坐标旋转、演员特技制作；变声变调的特殊的配音制作；解卷积；图像信号的压缩编码；高级加密解密；数字滤波器严格的线性相位特性，等等。

4. 数字信号处理涉及的理论、实现技术与应用

正是由于以上的优点，数字信号处理的理论和技术一出现就受到人们的极大关注，发展非常迅速。国际上一般把 1965 年作为数字信号处理这一门新学科的开端，40 多年以来，这门学科基本上形成了自己一套完整的理论体系，其中也包括各种快速的和优良的算法。而且随着各种电子技术及计算机技术的飞速发展，数字信号处理的理论和技术还在不断丰富和完善，新的理论和新技术层出不穷。可以说，数字信号处理是发展最快、应用最广泛、成效最显著的新学科之一，目前已广泛地应用在语音、雷达、声纳、地震、图像、通信、控制、生物医学、遥感遥测、地质勘探、航空航天、故障检测、自动化仪表等领域。

数字信号处理涉及的内容非常丰富广泛。其所应用的数学工具涉及微积分、随机过程、高等代数、数值分析、复变函数、数值方法和各种变换(傅里叶变换, Z 变换, 离散傅里叶变换, 小波变换, ……)等; 数字信号处理的理论基础包括网络理论、信号与系统、神经网络等; 数字信号处理的实现技术又涉及计算机、DSP 技术、微电子技术、专用集成电路设计和程序设计等方面; 应用领域包括通信、雷达、人工智能、模式识别、航空航天、图像处理、语音处理等。

由此可见, 要从事数字信号处理理论研究和应用开发工作, 需要学习的知识很多。本书作为数字信号处理的基础教材, 主要讲述数字信号处理的基本原理和基本分析方法, 作为今后学习上述专门知识和技术的基础。

第 1 章 时域离散信号和时域离散系统

1.1 引 言

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。物理信号的自变量有多种，可以是时间、距离、温度、位置等，本书一般把信号看做时间的函数。针对信号的自变量和函数值的取值情况，信号可分为以下三种。

如果信号的自变量和函数值都取连续值，则称这种信号为模拟信号或者称为时域连续信号，例如语言信号、温度信号等；如果自变量取离散值，而函数值取连续值，则称这种信号称为时域离散信号，这种信号通常来源于对模拟信号的采样；如果信号的自变量和函数值均取离散值，则称为数字信号。我们知道，计算机或者专用数字信号处理芯片的位数是有限的，用它们分析与处理信号，信号的函数值必须用有限位的二进制编码表示，这样信号本身的取值不再是连续的，而是离散值。这种用有限位二进制编码表示的时域离散信号就是数字信号，因此，数字信号是幅度量化了的时域离散信号。

例如： $x_a(t) = 0.9 \sin(50\pi t)$ ，这是一个模拟信号，如果对它按照时间采样间隔 $T = 0.005$ s 进行等间隔采样，便得到时域离散信号 $x(n)$ ，即

$$x(n) = x_a(t) \Big|_{t=nT} = 0.9 \sin(50\pi nT) \\ = \{\dots, 0.0, 0.6364, 0.9, 0.6364, 0.0, -0.6364, 0.9, -0.6364, \dots\}$$

显然，时域离散信号是时间离散化的模拟信号。如果用四位二进制数表示该时域离散信号，便得到相应的数字信号 $x[n]$ ，即

$$x[n] = \{\dots, 0.000, 0.101, 0.111, 0.101, 0.000, 1.101, 1.111, 1.101, \dots\}$$

显然，数字信号是幅度、时间均离散化的模拟信号，或者说是幅度离散化的时域离散信号。

信号有模拟信号、时域离散信号和数字信号之分，按照系统的输入输出信号的类型，系统也分为模拟系统、时域离散系统和数字系统。当然，也存在模拟网络和数字网络构成的混合系统。

数字信号处理最终要处理的是数字信号，但为简单，在理论研究中一般研究时域离散信号和系统。时域离散信号和数字信号之间的差别，仅在于数字信号存在量化误差，本书将在第 9 章中专门分析实现中的量化误差问题。

本章作为全书的基础，主要学习时域离散信号的表示方法和典型信号、时域离散线性时不变系统的时域分析方法，最后介绍模拟信号数字处理方法。

1.2 时域离散信号

实际中遇到的信号一般是模拟信号，对它进行等间隔采样便可以得到时域离散信号。

假设模拟信号为 $x_a(t)$ ，以采样间隔 T 对它进行等间隔采样，得到：

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

这里， $x(n)$ 称为时域离散信号，式中的 n 取整数，将 $n = \dots, 0, 1, 2, 3, \dots$ 代入上式，得到：

$$x(n) = \{\dots, x_a(-T), x_a(0), x_a(T), x_a(2T), \dots\}$$

显然， $x(n)$ 是一个有序的数字，因此时域离散信号也可以称为序列。注意这里 n 取整数，非整数时无定义。时域离散信号有三种表示方法：

1) 用集合符号表示序列

数的集合用集合符号 $\{\cdot\}$ 表示。时域离散信号是一个有序的数的集合，可表示成集合：

$$x(n) = \{x_n, n = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots\}$$

例如，一个有限长序列可表示为

$$x(n) = \{1, 2, 3, 4, 3, 2, 1; n = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

也可简单地表示为

$$x(n) = \{\underline{1}, 2, 3, 4, 3, 2, 1\}$$

集合中有下划线的元素表示 $n=0$ 时刻的采样值。

2) 用公式表示序列

例如：

$$x(n) = a^{|n|} \quad 0 < a < 1, -\infty < n < \infty$$

3) 用图形表示序列

例如，时域离散信号 $x(n) = \sin(\pi n/5)$ ， $n = -5, -4, \dots, 0, \dots, 4, 5$ ，图 1.2.1 就是它的图形表示。

这是一种很直观的表现方法。为了醒目，常常在每一条竖线的顶端加一个小黑点。

实际中要根据具体情况灵活运用三种表示方法，对于一般序列，包括由实际信号采样得到的序列，或者是一些没有明显规律的数据，可以用集合或波形图表示。

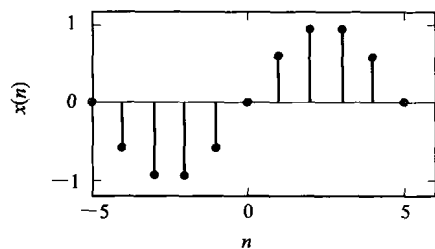


图 1.2.1 $x(n) = \sin(\pi n/5)$ 的波形图

下面介绍用 MATLAB 语言表示序列。

MATLAB 用两个参数向量 x 和 n 表示有限长序列 $x(n)$ ， x 是 $x(n)$ 的样值向量， n 是位置向量（相当于图形表示方法中的横坐标 n ）， n 与 x 长度相等，向量 n 的第 m 个元素 $n(m)$ 表示样值 $x(m)$ 的位置。位置向量 n 一般都是单位增向量，产生语句为： $n = ns:nf$ ；其中 ns 表示序列 $x(n)$ 的起始点， nf 表示序列 $x(n)$ 的终止点。这样将有限长序列 $x(n)$ 记为 $\{x(n); n = ns:nf\}$ 。

例如， $x(n) = \{-0.0000, -0.5878, -0.9511, -0.9511, -0.5878, 0.0000, 0.5878, 0.9511, 0.9511, 0.5878, 0.0000\}$ ，相应的 $n = -5, -4, -3, \dots, 5$ ，所以序列 $x(n)$ 的 MATLAB 表示如下：