



普通高等教育“十三五”规划教材
电子信息科学与工程类专业规划教材

数字信号处理

(第2版)

◆ 王春民 主 编

Electronic Information
Science and Engineering



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十三五”规划教材
电子信息科学与工程类专业规划教材

数字信号处理

(第2版)

王春民 主编

郑海峰 尹晶 蒲鑫 王强 副主编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书根据高等学校人才培养目标编写,既适合理论教学,又加强实验环节,注重技术创新。全书共8章,主要内容包括:时域离散信号和系统、离散系统的变换域分析与系统结构、离散傅里叶变换(DFT)、快速傅里叶变换(FFT)、无限长单位脉冲响应(IIR)数字滤波器的设计、有限长单位脉冲响应(FIR)数字滤波器的设计、数字信号处理中的有限字长效应和MATLAB仿真实验。本书包含大量应用实例及MATLAB仿真,另外配套多媒体电子课件、仿真程序代码和习题参考答案。

本书可作为高等学校电子信息工程、电子信息科学与技术、通信工程、测控技术与仪器、自动化、电气工程及其自动化、轨道交通信号与控制等本科专业的教材,也可作为电类工程技术人员的参考资料。

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。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理 / 王春民主编. —2版. —北京:电子工业出版社, 2018.9

ISBN 978-7-121-34923-2

I. ①数… II. ①王… 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(2018)第195994号

策划编辑:王羽佳

责任编辑:王晓庆

印 刷:北京虎彩文化传播有限公司

装 订:北京虎彩文化传播有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:16.5 字数:476千字

版 次:2013年5月第1版

2018年9月第2版

印 次:2018年9月第1次印刷

定 价:45.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010)88254535, wyj@phei.com.cn。

前 言

本书第1版出版后,承蒙各兄弟院校的厚爱与支持,已经重印多次。根据数字信号处理技术发展和多年教学实践,本次再版在内容上做了较大的更新,使理论教学和仿真环节更加紧密结合,优化和补充实验内容,增加 MATLAB 集成功能强大的滤波器设计工具 FDA Tool(Filter Design and Analysis Tool)方面的内容(简介),该工具可以完成多种滤波器的设计、分析和性能评估,进一步突出理论和实际的有机结合,删除部分相关性不紧密的仿真内容,进一步反映数字信号处理技术的发展和教学内容的更新。

信息和计算机技术的突飞猛进促使信号处理技术迅速发展,尤其是数字信号处理技术,借助于计算机、DSP 软硬件、FPGA 和 MATLAB 第三方环境,数字信号处理技术在许多领域得到了广泛应用,并且形成极其重要的学科。目前,高等学校的电子信息工程、通信工程、电气工程及其自动化、测控技术与仪器、自动化、轨道交通信号与控制等专业已将“数字信号处理”设为一门重要的专业基础课,并通过理论和实验教学,使学生掌握数字信号处理的基本理论、基本分析方法和实现手段。

数字信号处理理论性强,涉及面广,与先修课程高等数学、复变函数、电路分析、信号与系统等有较强的关联性。学生在初学时往往感到抽象,理解困难,掌握难度大,如果处理不当,会使学生望而生畏,失去学习兴趣。因此,为适应教育改革的需要,结合教材的现状,作者经过多年本科教学实践,并密切关注学科和技术及教育的发展,深刻体会到编写既能适合理论教学、又加强实验环节、贴近教学实际需要的《数字信号处理》特色教材的必要性。

作者从事“数字信号处理”课程教学多年,有一定的教学经验和体会,参考国内外许多优秀教材,博采众长,为适应教育改革和教材建设的需要,本着培养应用型人才的宗旨,突出“实用性”,强调以“针对性”和“够用”为基本原则,进行本书编写。编写过程对涉及的基本原理、基本方法、基本概念等叙述透彻,阐述准确明晰,对于理论的深度和内容的广度处理,力求满足应用型人才培养的基本要求。

书中贯穿有针对性的 MATLAB 仿真实例,做到理论问题直观化,复杂问题简单化,并且突出理论与实践的密切结合。本书适用专业宽泛,可作为高等学校电子信息工程、电子信息科学与技术、通信工程、测控技术与仪器、自动化、电气工程及其自动化、轨道交通信号与控制等专业的教学用书,也可作为电类工程技术人员的参考用书。

本书共8章,第1章主要讨论时域离散信号和系统,包括常用典型信号的表示和运算,离散系统的线性移不变、因果和稳定性,输入/输出描述法——差分方程,模拟信号的数字处理方法及信号的重构,以及与本章相关的应用实例和 MATLAB 仿真。

第2章主要讨论时域离散信号和系统的频域分析,涉及非周期离散时间傅里叶变换(DTFT)的定义和性质, Z 变换(ZT)的定义、收敛域、性质、 Z 反变换及利用 Z 变换分析信号和系统的频域特性,讨论了IIR和FIR网络结构,以及结合本章内容的实例和 MATLAB 仿真。

第3章主要讨论离散有限长序列的傅里叶变换(DFT),涉及周期序列的离散傅里叶级数(DFS)、离散傅里叶变换的定义和性质、DFT与 Z 变换的关系、频域抽样定理、DFT的应用实例、用DFT计算线性卷积和信号的谱分析、频谱泄漏和栅栏效应,以及 MATLAB 在本章实例中的应用等内容。

第4章重点讲述快速傅里叶变换(FFT),主要涉及直接计算DFT的特点及减少运算量的基本途径,按时域抽取的FFT(DIT-FFT)算法基本原理、运算规律及编程思想,FFT算法与直接计算DFT

运算量的比较,按频域抽取的FFT(DIF-FFT)算法原理及反变换(IDFT)的快速算法。

第5章主要讨论无限长单位脉冲响应(IIR)数字滤波器的设计,介绍数字滤波器的基本概念,概述模拟滤波器的设计方法,详细讲述用冲激响应不变法和双线性变换法的离散化原理、适用范围和各自的优缺点,给出IIR数字滤波器两种频率变换法设计及本章的应用实例和MATLAB仿真。

第6章着重讨论有限长单位脉冲响应(FIR)数字滤波器的设计,涉及线性相位FIR-DF的条件和特点,利用窗函数法设计FIR-DF,对IIR与FIR数字滤波器的特性进行比较,并结合本章内容给出应用实例和MATLAB仿真等内容。

第7章主要讨论数字滤波器的实现的量化效应等相关问题。

第8章集中讨论实验仿真的内容,并提供8个方面的MATLAB仿真实验,目的在于加强学生对数字信号处理理论方面的深入理解,增强理论与实践结合的能力。

最后安排4个附录,附录A为巴特沃斯滤波器系统函数分母多项式系数和特征方程的根(极点),附录B为切比雪夫低通滤波器设计,附录C为等比级数前 N 项和公式及其应用举例,附录D为MATLAB简介。

教学中,可以根据教学对象和学时等具体情况对书中的内容进行删减和组合,也可以进行适当扩展。为适应教学模式、教学方法和手段的改革,本书配套多媒体电子课件、仿真程序代码和习题参考答案,请登录华信教育资源网(<http://www.hxedu.com.cn>)注册下载。

本书由长春理工大学光电信息学院/吉林大学王春民教授主编,编写第5章并负责本书的统稿工作;蒲鑫编写绪论、第1章和第7章部分内容;郑海峰编写第2章、第3章、第4章和第6章;尹晶编写第8章和附录及第5章的部分内容;王强参与编写第7章部分内容。长春理工大学光电信息学院的崔艳群讲师和刘春艳讲师参与了全书的校对;长春理工大学光电信息学院的乔良副教授、张晶副教授、白烨实验教师也参与了部分工作。

我们在编写过程中参考了国内外许多优秀教材,在完善本书内容方面起到了积极作用,在此深表谢意。本书的编写得到了长春理工大学光电信息学院和电子分院、吉林大学仪器科学与电气工程学院的大力支持,在此表示由衷的感谢。

由于作者的水平有限,书中不妥和错误之处在所难免,恳请专家和读者批评指正。

作者

于长春

2018年8月

目 录

绪论.....	1
第 1 章 时域离散信号和系统.....	5
1.1 引言.....	5
1.2 时域离散信号与序列运算.....	5
1.2.1 时域离散信号及其表示.....	5
1.2.2 序列的运算.....	6
1.2.3 序列的能量、周期性及常用典型序列.....	18
1.3 时域离散系统.....	23
1.3.1 线性系统.....	24
1.3.2 移不变系统.....	25
1.3.3 线性移不变系统.....	26
1.3.4 系统的因果性和稳定性.....	28
1.4 模拟信号数字处理方法.....	30
1.4.1 采样定理及 A/D 转换器.....	30
1.4.2 采样信号的恢复.....	32
1.5 本章小结.....	34
习题 1.....	35
第 2 章 离散系统的变换域分析与系统结构.....	38
2.1 引言.....	38
2.2 序列 Z 变换的定义和收敛域.....	38
2.3 Z 变换的基本性质和定理.....	43
2.4 Z 反变换.....	44
2.5 非周期序列的傅里叶变换及其性质.....	49
2.5.1 非周期序列的傅里叶变换.....	49
2.5.2 非周期序列傅里叶变换的性质.....	51
2.6 序列的傅里叶变换、 Z 变换和拉普拉斯变换的关系.....	55
2.6.1 序列 $x(n)$ 的傅里叶变换与序列 $x(n)$ 的 Z 变换之间的关系.....	55
2.6.2 序列的 Z 变换与拉普拉斯变换之间的关系.....	55
2.6.3 连续信号 $x_a(t)$ 的傅里叶变换 $X_a(j\Omega)$ 与序列 $x(n)$ 的 Z 变换 $X(z)$ 之间的关系.....	56
2.7 离散系统的系统函数和变换域分析.....	56
2.7.1 频率响应和系统函数.....	57
2.7.2 系统函数、频率响应和差分方程的关系.....	57
2.7.3 系统函数与系统稳定因果性的关系.....	59
2.8 离散系统的基本网络结构.....	60
2.8.1 离散系统的方框图表示.....	60
2.8.2 无限长单位脉冲响应 (IIR) 滤波器基本网络结构.....	61
2.8.3 有限长单位脉冲响应 (FIR) 滤波器基本网络结构.....	64
2.9 本章小结.....	66
习题 2.....	67

第3章 离散傅里叶变换 (DFT)	72
3.1 周期序列的离散傅里叶级数	72
3.2 离散傅里叶变换	74
3.2.1 离散傅里叶变换的定义式	74
3.2.2 DFT 与 ZT、FT 之间的关系	75
3.3 离散傅里叶变换的性质	77
3.3.1 隐含周期性	77
3.3.2 线性性质	78
3.3.3 循环移位性质	78
3.3.4 循环卷积性质	79
3.3.5 共轭对称性	82
3.4 频率域采样理论	83
3.5 应用实例	84
3.5.1 利用 DFT 求卷积和	84
3.5.2 利用 DFT 对信号进行近似谱分析	84
3.6 本章小结	88
习题 3	88
第4章 快速傅里叶变换 (FFT)	91
4.1 引言	91
4.2 基-2 FFT 算法	91
4.2.1 直接计算 DFT 的特点及减少运算量的基本途径	91
4.2.2 按时间抽取的基-2 FFT 的基本原理	93
4.2.3 DIT-FFT 算法特点与运算量	97
4.2.4 按频域抽取的基-2 FFT 的基本原理	98
4.2.5 IDFT 的高效算法	101
4.3 应用实例	102
4.4 MATLAB 仿真	103
4.4.1 利用 FFT 求圆周卷积和线性卷积	103
4.4.2 利用 FFT 进行频谱分析	104
4.5 本章小结	106
习题 4	107
第5章 无限长单位脉冲响应 (IIR) 数字滤波器的设计	109
5.1 引言	109
5.2 滤波器性能指标与设计步骤	109
5.2.1 滤波器概述	109
5.2.2 数字滤波器的性能指标	112
5.2.3 常用模拟滤波器设计方法	114
5.3 冲激响应不变法	120
5.3.1 变换原理	120
5.3.2 模拟滤波器的数字化方法	121

5.3.3 用冲激响应不变法实现 IIR 数字滤波器.....	122
5.3.4 冲激响应不变法的优点和缺点.....	123
5.4 双线性变换法.....	127
5.4.1 变换原理.....	127
5.4.2 模拟滤波器的数字化方法.....	128
5.4.3 用双线性变换法实现 IIR 数字滤波器.....	130
5.5 用模拟低通滤波器设计 IIR 数字滤波器.....	132
5.5.1 模拟低通滤波器转换成数字低通滤波器.....	133
5.5.2 模拟低通滤波器转换成数字带通滤波器.....	136
5.5.3 模拟低通滤波器转换成 IIR 数字高通滤波器.....	141
5.5.4 模拟低通滤波器转换成 IIR 数字带阻滤波器.....	145
5.5.5 数字域的频率变换法设计.....	150
5.5.6 IIR 数字滤波器综合设计举例.....	160
5.6 本章小结.....	170
习题 5.....	171
第 6 章 有限长单位脉冲响应 (FIR) 数字滤波器的设计.....	173
6.1 线性相位 FIR 滤波器的含义与特点.....	173
6.1.1 线性相位系统的时域特点.....	173
6.1.2 线性相位系统的幅度特点.....	174
6.1.3 线性相位 FIR 数字滤波器零点分布的特点.....	176
6.2 FIR 数字滤波器的线性相位结构.....	176
6.3 用窗函数法设计 FIR 数字滤波器.....	178
6.4 IIR 滤波器与 FIR 滤波器的对比.....	190
6.5 本章小结.....	190
习题 6.....	191
第 7 章 数字信号处理中的有限字长效应.....	195
7.1 引言.....	195
7.2 二进制数的表示及 A/D 转换的量化效应.....	195
7.2.1 二进制数的表示.....	195
7.2.2 定点制的量化误差.....	197
7.2.3 A/D 转换的量化效应.....	200
7.3 数字滤波器的系数量化效应.....	202
7.3.1 系数量化对滤波器零、极点位置的影响.....	202
7.3.2 IIR 数字滤波器的有限字长效应.....	204
7.3.3 FIR 数字滤波器的有限字长效应.....	205
7.4 FFT 算法的有限字长效应.....	206
7.4.1 定点 FFT 计算中的有限字长效应.....	206
7.4.2 系数量化对 FFT 的影响.....	208
7.5 本章小结.....	209
习题 7.....	209

第8章 MATLAB 仿真实验	211
实验一 离散系统的时域分析	211
实验二 离散系统的时域特性	214
实验三 时域抽样	218
实验四 频域抽样	221
实验五 离散系统的复频域分析	223
实验六 DFT/FFT 频谱分析及应用	227
实验七 IIR 数字滤波器的设计	232
实验八 FIR 数字滤波器的设计	236
附录 A 巴特沃斯低通滤波器系统函数分母多项式系数和特征方程的根(极点)	240
附录 B 切比雪夫低通滤波器设计	241
附录 C 等比级数前 N 项和公式及其应用举例	246
附录 D MATLAB 简介	247
参考文献	255

绪 论

信息技术的蓬勃发展正在改变着人类的生产和生活。计算机技术及电子技术的发展推动了数字信号处理技术的发展,数字信号处理技术也同样促进了计算机技术的发展。信号是信息的载体,信号处理是研究对含有信息的信号进行处理(变换),以获得人们所希望的信号,从中提取信息、利用信息的一门学科。由于模拟信号难以做到高精度,并且可靠性差、不灵活,故随着大规模集成电路和数字信号处理技术的成熟和发展,现在用数字方法处理信号(数字信号处理)已基本取代了模拟信号处理。

数字信号处理就是利用数字计算机或专用数字硬件对数字信号进行变换、加工处理运算,用数字的数值计算方法处理,达到提取有用信息的目的。国际上一般把1965年由Cooley-Turkey提出的快速傅里叶变换(FFT)作为数字信号处理这一学科的产生时间。

数字信号处理把数字或符号表示成序列,通过计算机或专用处理设备,用数字的方式去处理这些序列,以达到更符合人们要求的信号形式。例如,对信号的滤波,提取和增强信号的有用分量,削弱无用的分量,或估计信号的某些特征参数。总之,凡是用数字方式对信号进行滤波、变换、增强、压缩、估计、识别等,都是数字信号处理的研究对象。

1. 数字信号处理系统的组成

数字信号处理的目的是利用计算机或专用数字信号处理设备来处理信号以得到有用信息,但是计算机或专用数字信号处理设备只能处理时域上是离散的、频域上也是离散的信号。由于现实世界中的信号多为连续信号,要实现对现实世界连续信号的处理,必须先进行模数转换。通常,数字信号处理系统由前置预滤波器、A/D转换器、数字信号处理器、D/A转换器、模拟滤波器组成。数字信号处理系统的组成框图如图0-1所示。

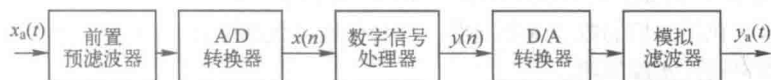


图0-1 数字信号处理系统的组成框图

模拟信号先经过前置预滤波器,将输入信号中高于某一频率(称为折叠频率,等于抽样频率的一半)的分量加以滤除,使进入A/D转换器中的信号在某一频率范围内。A/D转换器通过抽样保持、量化、编码的过程,对信号进行数字化处理,将模拟信号用数字信号表示,时间离散化、幅度离散化是这种数字信号的特点,可以用二进制序列 $x(n)$ 来表示。数字信号处理器(DSP)对输入的数字信号 $x(n)$ 进行变换,加工处理得到输出信号 $y(n)$ 。D/A转换器将数字信号 $y(n)$ 变成模拟信号,这些模拟信号在时间上的幅度等于序列 $y(n)$ 中相应数码所代表的数值。模拟滤波器滤除不需要的高频分量,形成平滑的模拟输出信号 $y_a(t)$ 。

当然实际的系统并不一定包括所有框图,例如,有些系统只需数字输出,可直接以数字形式显示或打印,那么就不需要D/A转换器了。另外一些系统,其输入就是数字量,因而就不需要A/D转换器了。对于纯数字系统,则只需要数字信号处理器这一核心部分即可。

2. 数字信号处理的学科概貌

数字信号处理的基本工具包括微积分、概率统计、随机过程、高等代数、数值分析、近世代数和

复变函数。语音信号处理、数字图像处理和模式识别都是在数字信号处理基础上发展起来的学科。数字信号处理的理论基础是线性移不变 (LSI) 系统理论和离散傅里叶变换 (DFT)。

数字信号处理的学科概貌如图 0-2 所示, 其中, 时域离散线性移不变 (LSI) 系统理论和离散傅里叶变换 (DFT) 是数字信号处理领域的理论基础, 而数字滤波和数字频谱分析是数字信号处理的两个基本学科分支。

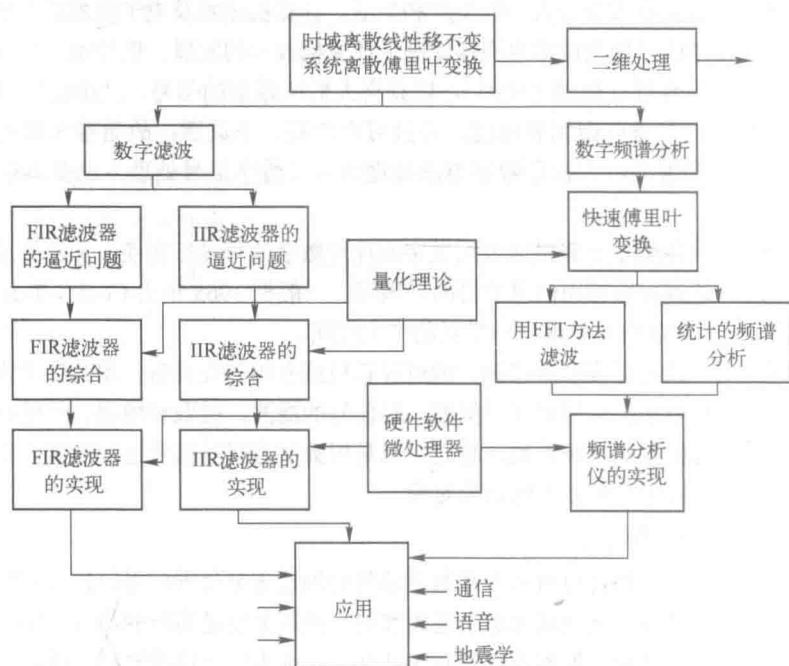


图 0-2 数字信号处理的学科概貌

数字滤波领域则分为无限长单位脉冲响应 (IIR) 数字滤波器和有限长单位脉冲响应 (FIR) 数字滤波器两部分内容。包括它们的数学逼近问题、综合问题 (包括选择滤波器结构和选择运算字长) 及具体的硬件或计算机软件实现问题。

数字频谱分析领域包括两部分内容: (1) 确定信号的频谱分析, 这可采用离散傅里叶变换 (DFT) 法来进行分析, 对于较复杂的情况, 可采用线性调频 Z 变换 (CZT); (2) 随机信号的频谱分析, 这就是统计谱分析法。实际谱分析技术中都要用到快速傅里叶变换 (FFT) 和一些快速卷积算法。FFT 还可用来实现 FIR 数字滤波运算, 而统计频谱分析法又可用于研究数字信号处理系统的量化噪声效应 (二维和三维信号处理则是最新发展的领域)。

3. 数字信号处理的特点

数字信号处理采用数字系统完成信号处理的任任务, 它具有数字系统的一些共同优点, 如抗干扰、可靠性强、便于大规模集成等。除此之外, 与传统的模拟信号处理方法相比较, 它还具有以下一些明显优点。

(1) 精度高。模拟网络的精度由元器件决定, 在模拟系统的电路中, 元器件精度要达到 10^{-3} 以上已经不容易了, 而数字系统 17 位字长可以达到 10^{-5} 的精度, 这是很平常的。例如, 基于离散傅里叶变换的数字式频谱分析仪, 其幅值精度和频率分辨率均远远高于模拟频谱分析仪。

(2) 灵活性高。数字信号处理采用了专用或通用的数字系统, 数字系统的性能主要取决于运算程序和乘法器的系数, 而系数是存放在系数存储器中的, 只需改变运算程序或存储的系数, 就可得到不

同的系统,比改变模拟系统方便得多。

(3) 可靠性高。因为数字系统只有两个信号电平“0”“1”,因而受周围环境温度及噪声的影响较小,而模拟系统中,各元器件都有一定的温度系数,且电平是连续变化的,易受温度、噪声、电磁感应等的影响。如采用大规模集成电路,可靠性就更高。

(4) 易于大规模集成。由于数字部件有高度规范性,便于大规模集成和大规模生产。

(5) 时分复用。也就是利用数字信号处理器同时处理几个通道的信号。处理器运算速度越高,能处理的信道数目也就越多。

(6) 可获得高性能指标。例如,对信号进行频谱分析,模拟频谱仪在频率低端只能分析 10Hz 以上频率,且难于做到高分辨率(足够窄的带宽),但在数字的谱分析中,已能做到 10^{-3}Hz 的谱分析。又如有限长冲激响应数字滤波器,可实现准确的线性相位特性,这在模拟系统中是很难达到的。并且,数字系统可以实现模拟系统很难达到的指标或特性。例如,有限长单位脉冲响应数字滤波器可以实现严格的线性相位;在数字信号处理中可以将信号存储起来,用延迟的方法实现非因果系统,从而提高了系统的性能指标。

(7) 二维与多维处理。利用庞大的存储单元,可以存储二维的图像信号或多维的阵列信号,实现二维或多维的谱分析,以及实现二维甚至多维信号的处理,包括二维或多维滤波及谱分析等。

数字信号处理系统也有局限性,例如,增加了系统的复杂性,需要模拟接口及比较复杂的数字系统;应用的频率范围受到限制,主要是 A/D 转换器的抽样频率的限制;系统的功率消耗比较大,数字信号处理系统中集成了几十万甚至更多的晶体管,而模拟信号处理系统中大量使用的是电阻、电容、电感等无源器件,随着系统复杂性的增加,这一矛盾会更加突出。另外,在实时性方面,还不如模拟系统(但随着计算机处理速度和 DSP 处理实时性的不断提高,该问题并不突出)。

4. 数字信号处理的发展及应用

数字信号处理由于其独特的学科特点形成了其发展规律。

(1) 由简单的运算向复杂的运算发展,目前几十位乘几十位的全并行乘法器可以在几纳秒的时间内完成一次浮点乘法运算,这在运算速度上和运算精度上均为复杂的数字信号处理算法提供了先决条件。

(2) 由低频向高频发展,模数转换器的抽样频率已高达数百兆赫兹,可以将视频甚至更高频率的信号数字化后送入计算机处理。

(3) 由一维向多维发展,像高分辨率彩色电视、雷达、地质和石油勘探等多维信号处理的应用领域已与数字信号处理结下了不解之缘。

(4) 各种数字信号处理系统几经更新换代,在图像处理方面,图像数据压缩是多媒体通信、影碟机(VCD 或 DVD)和高清晰度电视(HDTV)的关键技术。国际上先后制定的标准 H.261、JPEG、MPEG-1 和 MPEG-2 中均使用了离散余弦变换(DCT)算法。近年来发展起来的小波(Wavelet)变换也是一种具有高压缩比和快速运算特点的崭新压缩技术,应用前景十分广阔,有望成为新一代压缩技术的标准。

数字信号处理具有突出优点,因而在通信、语音、雷达、地震测报、声呐、遥感、生物医学、电视、仪器中得到愈来愈多的应用,如程控交换机、移动通信系统、数字照相机、液晶电视、家庭影院、全球定位系统(GPS)、医院用的 B 超、CT、核磁共振、卫星遥感遥测、天气预报、地震预报、地震探矿、数字化士兵和数字化战争等。

数字信号处理还在不断开辟新的应用领域,在机械制造中,基于 FFT 算法的频谱分析仪用于振动分析和机械故障诊断;医学中使用数字信号处理技术对心电(ECG)和脑电(EEG)等生物电信号进

行分析和处理;数字音频广播(DAB)广泛地使用了数字信号处理技术。除此之外,数字信号处理在机器人控制、虚拟仪器系统和汽车电子方面也有着长足的应用。可以说,数字信号处理技术已在信息处理领域引起了广泛的关注和高度的重视,数字化已经进入各个领域并影响着人们的生活。

5. 数字信号处理系统的实现

数字信号处理系统的实现主要有以下几种方法。

(1) 利用通用计算机用软件实现。软件采用高级语言编写,也可利用商品化的各种 DSP 软件。MATLAB 是美国 MathWorks 公司出品的商业数学软件,用于算法开发、数据可视化、数据分析及数值计算的高级技术计算语言和交互式环境,主要包括 MATLAB、Simulink 和符号运算三部分。该方法实现简单、灵活,但实时性较差,很少用于实时系统,主要用于教学和科研的前期研制阶段。另外,Lyrtch 推出了 Lyrtch Signal Processing (LSP) 快速原型开发平台。该平台继承了 MATLAB/Simulink 算法仿真环境和 DSP+FPGA 的快速原型开发板,无缝地实现了自顶向下的开发流程。LSP 信号处理快速原型开发系统由一系列硬件板卡和相对应的软件模块组成,该系统为用户提供了两种开发流程——系统级开发流程和底层开发流程,用户可以根据自己的开发习惯进行自由选择。LSP 快速开发平台已广泛应用于无线通信、音视频信号处理、航天航空国防控制和汽车电子等各个领域。

(2) 利用单片机。单片机技术发展现已相当成熟,不仅价格便宜,而且功能很强。可根据不同环境选用不同型号的单片机,用来进行实时控制,但数据运算量不能太大。

(3) 利用通用 DSP 芯片。DSP 芯片与单片机相比有更为突出的优点,如 DSP 内部带有乘法器、累加器,采用流水线工作方式及并行结构,多总线速度快,配有适于信号处理的指令(如 FFT 指令)等。

目前市场上的 DSP 芯片有美国德州仪器公司(TI)的 TMS320CX 系列,AT&T 公司的 DSP16、DSP32 系列, Motorola 公司的 DSP56x、DSP96x 系列和 AD 公司的 ADSP21×、ADSP210×系列等。

(4) 利用特殊用途的 DSP 芯片。是指专门用于 FFT、FIR 滤波器,实现卷积、相关运算等的专用数字芯片。目前此类 DSP 芯片有 BB 公司的 DF17××系列, MAXIM 公司的 MAXIM27×、MAXIM28×系列, National 公司的 National-SEMI 系列和 MF 系列等。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输出数据。

(5) 一些典型的数字信号处理算法,如 FFT、FIR 和 IIR 滤波器,可以采用 FPGA 实现。FPGA 是现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array)的简称,能够以低系统开销和低成本实现高速乘-累加操作,并且可以高效地实行并行运算,尤其是对于滤波这样的重复任务,并行处理远超串行架构。FPGA 在硬件设计方面,使用硬件描述语言 HDL(Hardware Description Language)。现在有两种 HDL 语言,一种是 VHDL,另一种是 Verilog HDL,两种语言对 FPGA 实现数字信号处理都适用。

第1章 时域离散信号和系统



学习重点

- ★ 掌握信号的分类、时域离散信号的表示。
- ★ 掌握序列的运算、序列的周期性及常用典型序列，学会判断序列的周期性。
- ★ 掌握时域离散系统的线性、因果性、稳定性。
- ★ 掌握信号的抽样频率选取条件，以及抽样信号恢复原始信号的原理。
- ★ 了解数字信号处理的分析方法及 MATLAB 仿真。

1.1 引言

时域离散信号和系统的时域、频域分析是数字信号处理的基础理论。在信号分析与处理理论中，通常将信号的自变量作为时间变量。信号可以按变量的取值是否连续进行分类：时间连续的信号称为时域连续信号；时间连续且幅值连续的信号称为模拟信号；时间离散的信号常称为时域离散信号。

信号是传递信息的函数。按照信号的分类，信号处理分为模拟信号处理和数字信号处理两类。处理信号的设施称为系统，如果系统的输入、输出都是模拟信号，则称为时域连续系统（简称模拟系统）；如果系统的输入、输出是时域离散信号，则称为时域离散系统（简称离散系统）。

按照信号特点的不同，信号可以表示成一个或几个独立变量的函数。例如，某个地区气温随时间变化的函数是一元函数；全国各地气温随时间变化的函数是二元函数。一维变量可以是时间，也可以是其他参量，习惯上将其看成时间。信号可以分为以下几种。

(1) 时域连续信号，其特点是时间连续，信号幅度函数取值可以是连续的，也可以是离散的。

时域连续信号是在连续时间范围内定义的信号，但信号的幅值可以是连续数值，也可以是离散数值。当幅值为连续变量时，又常称为模拟信号。

(2) 时域离散信号，其特点是时间离散，函数取值连续。

时域离散信号是时间为离散变量的信号，即时间被量化了，而幅度仍是连续变化的信号。

(3) 数字信号，其特点是时间离散，幅度函数取值量化。

数字信号是时间离散且幅度量化的信号，即时间变量被量化了，幅度函数取值为离散量化值的信号。

在本书中，主要把一维、确定的时域离散信号和时域离散系统作为研究的对象。

1.2 时域离散信号与序列运算

1.2.1 时域离散信号及其表示

时域离散信号只在离散时间上给出函数值，是时间上不连续的序列。

离散时间信号可以通过对连续时间信号抽样获得，用序列 $x(n)$ 来表示。但 $x(n)$ 具有更加广泛的含义，它不仅表示时间信号，也可以表示非时间信号。例如，某一时刻世界各地的气温就不是按时间顺序排列的序列。在研究这类信号时，通常可以将自变量视为时间信号。

若连续时间信号为 $x(t)$ ，抽样周期为 T ，则抽样得到离散时间信号（序列）

$$x(n) = x_a(t) \Big|_{t=nT} = x_a(nT) = x(nT) \quad (1-1)$$

式中，序号 n 为整数 ($n=0, \pm 1, \pm 2, \cdots$)，表示第 n 个抽样时间点。当 n 为非整数时，序列 $x(n)$ 无定义。
 $x(n)$ 既是序列的第 n 个序列值，又代表整个序列。

序列的表示方式有列举法、表达式表示法和序列波形表示法。例如，一个有限长序列在区间 $-2 \leq n \leq 4$ 具有非零值，则相应序列值依次为： $x(-2)=-1$ ， $x(-1)=0$ ， $x(0)=1$ ， $x(1)=2$ ， $x(2)=3$ ， $x(3)=4$ ， $x(4)=5$ 。

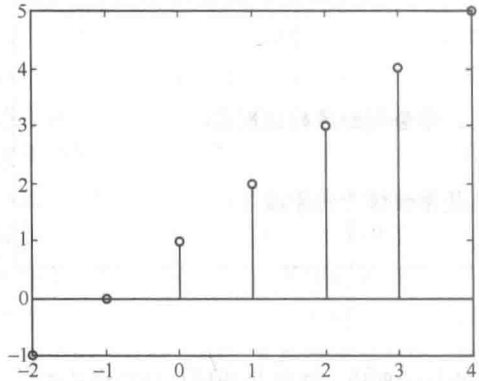


图 1-1 序列波形表示

用列举法表示为

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

其中箭头所指项为 $x(0)$ ，若无箭头，则序列从 $x(0)$ 项开始。

表达式为

$$x(n) = \begin{cases} n+1 & -2 \leq n \leq 4 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

序列波形如图 1-1 所示。

要点一：时域离散信号的表示方法有列举法、表达式表示法和序列波形表示法。

1.2.2 序列的运算

序列的基本运算主要包括相加、相乘、累加和、差分、移位、反褶、尺度变换（抽取和插值）、线性卷积和。其中，差分、累加和分别对应于连续时间信号的微分和积分运算。

假设有两个序列，其波形如图 1-2 所示。

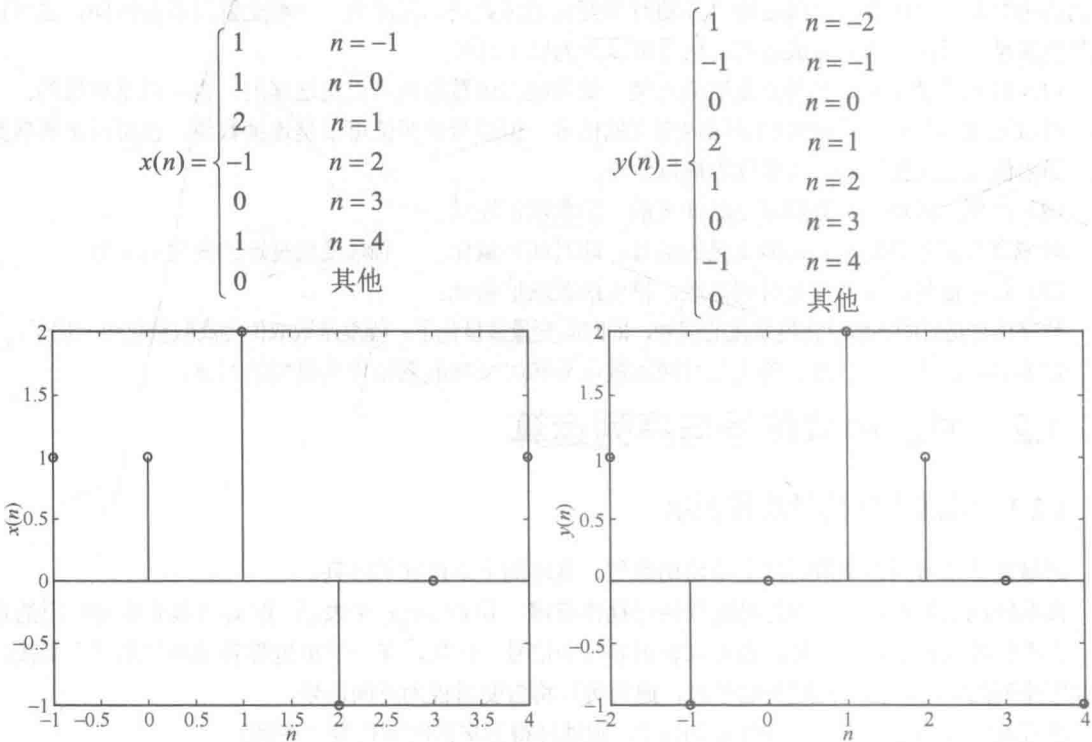


图 1-2 序列波形图

下面以这两个序列为例，介绍序列的基本运算。

1. 相加

两个序列相加是指同序列号的两个序列值逐项对应相加。表达式为

$$z(n) = x(n) + y(n) \quad (1-2)$$

【例 1-1】 计算如图 1-2 所示的序列 $x(n)$ 与序列 $y(n)$ 的和序列 $z(n)$ 。

解： $z(-2) = x(-2) + y(-2) = 0 + 1 = 1$

$$z(-1) = x(-1) + y(-1) = 1 + (-1) = 0$$

$$z(0) = x(0) + y(0) = 1 + 0 = 1$$

$$z(1) = x(1) + y(1) = 2 + 2 = 4$$

$$z(2) = x(2) + y(2) = (-1) + 1 = 0$$

$$z(3) = x(3) + y(3) = 0 + 0 = 0$$

$$z(4) = x(4) + y(4) = 1 + (-1) = 0$$

其余的序列值为 0，序列 $z(n)$ 为序列 $x(n)$ 与序列 $y(n)$ 的和序列。

要点二：两个序列相加是指同序列号的两个序列值逐项对应相加，得到一个新的序列。

2. 相乘

两个序列相乘是指同序列号的两个序列值逐项对应相乘。表达式为

$$z(n) = x(n) \cdot y(n) \quad (1-3)$$

【例 1-2】 计算如图 1-2 所示的序列 $x(n)$ 与序列 $y(n)$ 的乘积序列 $z(n)$ 。

解：同序列号的两个序列值对应相乘得：

$$z(n) = \begin{cases} 0 & n = -2 \\ -1 & n = -1 \\ 0 & n = 0 \\ 4 & n = 1 \\ -1 & n = 2 \\ 0 & n = 3 \\ -1 & n = 4 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

要点三：两个序列相乘是指同序列号的两个序列值逐项对应相乘，得到一个新的序列。

MATLAB 编程求例 1-1 和例 1-2 两个序列的和、乘积。

1. 建立一个主函数，命名为 main.m，程序如下：

```
n1=1:4;
n2=-2:4;
x1=[1,1,2,-1,0,1,0];
x2=[1,-1,0,2,1,0,-1,0];
[y3,n]=sigadd(x1,n1,x2,n2);
[y,n]=sigcheng(x1,n1,x2,n2);
subplot(2,2,1);
stem(n1,x1,'.');
grid;
xlabel('n1');
ylabel('x1');
subplot(2,2,2);
```

```

stem(n2,x2,'.');
grid;
xlabel('n2');
ylabel('x2');
subplot(2,2,3);
stem(n,y3,'.');
grid;
title('序列加');
xlabel('n');
ylabel('y3');
subplot(2,2,4);
stem(n,y,'.');
grid;
title('序列积');
xlabel('n');
ylabel('y');

```

2. 建立一个加法函数, 命名为 sigadd.m, 程序如下:

```

function[y3,n]=sigadd(x1,n1,x2,n2)n=min(min(n1),min(n2)):max(max(n1),max(
n2));
y1=zeros(1,length(n));
y2=zeros(1,length(n));
y1(find((n>=min(n1))&(n<=max(n1))==1))=x1;
y2(find((n>=min(n2))&(n<=max(n2))==1))=x2;
y3=y1+y2;

```

3. 建立一个乘法函数, 命名为 sigcheng.m, 程序如下:

```

function[y,n]=sigcheng(x1,n1,x2,n2)
n=min(min(n1),min(n2)):max(max(n1),max(n2));
y1=zeros(1,length(n));
y2=zeros(1,length(n));
y1(find((n>=min(n1))&(n<=max(n1))==1))=x1;
y2(find((n>=min(n2))&(n<=max(n2))==1))=x2;
y=y1.*y2;

```

注: 三个程序分别编译。

编程结果如图 1-3、图 1-4 所示。

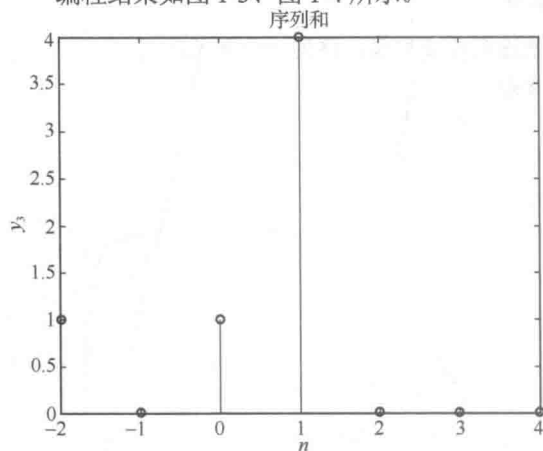


图 1-3 序列和

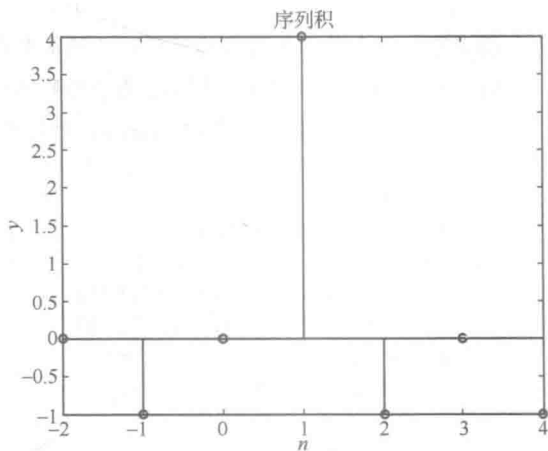


图 1-4 序列积