



普通高等教育“十二五”规划教材
电子电气基础课程规划教材

数字信号处理原理 及其 MATLAB 实现 (第3版)

■ 丛玉良 等编著 ■ 赵晓晖 主审

 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“十二五”规划教材
电子电气基础课程规划教材

数字信号处理原理 及其 MATLAB 实现

(第3版)

丛玉良 等编著 赵晓晖 主审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统地介绍了数字信号处理的基本理论、基本分析方法、相应算法及其软件实现。全书分为10章,内容包括离散时间信号与系统的时域分析、离散时间信号与系统的 z 域分析和频域分析、离散时间信号的傅里叶变换、离散傅里叶变换的快速算法及其他变换、数字滤波器概论、无限长数字滤波器和有限长数字滤波器设计、数字谱分析基本理论、数字信号处理技术的应用、MATLAB应用基础。

本书力求深入浅出,强调基本理论、基本概念和基本方法,注重数学概念和物理概念,并将计算机仿真软件MATLAB与教材内容紧密结合。书中各章节都附有例题、习题、上机练习题及MATLAB演示程序,以便使读者能更好地理解和掌握数字信号处理的基础理论和基本分析方法。

本书可作为高等院校通信工程、电子信息工程、测控技术及仪器、计算机科学与技术、工业电气自动化以及电子科学与技术等专业本科生的教材,也可作为有关领域的科技工作者和工程技术人员的自学参考书。

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

数字信号处理原理及其MATLAB实现/丛玉良等编著. —3版. —北京:电子工业出版社,2015.10

电子电气基础课程规划教材

ISBN 978-7-121-27092-5

I. ①数… II. ①丛… III. ①数字信号处理-计算机辅助计算-Matlab软件-高等学校-教材
IV. ①TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第207838号

责任编辑:韩同平 特约编辑:李佩乾

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

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 印张:18.25 字数:480千字

版 次:2005年7月第1版

2015年10月第3版

印 次:2015年10月第1次印刷

定 价:45.00元

凡所购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,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。

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。

服务热线:(010)88258888。

第3版前言

数字信号处理是20世纪60年代中期随着数字电子计算机和大规模集成电路技术的不断进步而迅速发展起来的一门新兴学科,数字信号处理理论、算法及实现手段近年来取得了飞速的进步,已广泛应用于雷达、通信、声呐、语音、图像、地震、遥感遥测、地质勘探、航空航天、生物医学工程等科学技术领域,是在这些领域中进行信号处理的重要工具。

传统的数字信号处理课程大多侧重于算法的理论及其推导,较少涉及实现方法及相关的软硬件技术,学生学起来容易感到枯燥、难懂,理解困难。本教材在阐明数字信号处理基础理论的同时,结合MATLAB语言来实现对数字信号的分析、处理,以验证理论给出的重要结论。本教材对大部分例题都给出了具体的MATLAB程序,学生通过上机实验可以加深对理论问题的理解。

本教材第1版、第2版分别于2005年、2009年出版,承蒙广大师生的厚爱,被多所大学选做教材。第3版与第1版、第2版相比较,总体结构没有太大变化,仍然强调基础,增加了全通系统和最小相位系统概念;修改了部分MATLAB程序,突出理论和实际相结合;凝炼了部分章节内容,使学生更好地掌握数字信号处理的基本理论、基本方法和基本应用。

全书共10章,可分为五个部分。

第1~4章为第一部分,主要介绍数字信号处理的基本理论。第1章介绍了离散时间信号与系统的时域分析方法。第2章讲述离散时间信号与系统的 z 域和频域分析方法。第3章讨论数字信号处理中的核心理论——离散傅里叶变换(DFT),包括离散傅里叶级数(DFS)及性质、离散傅里叶变换及性质,以及离散傅里叶变换与其他变换的关系。第4章介绍离散傅里叶变换的快速算法(FFT),以及离散余弦变换和短时傅里叶变换。

第5~7章为第二部分,主要讲述数字滤波器原理和设计。第5章讲述数字滤波器的基本原理、分类及结构。第6章讨论无限冲激响应(IIR)数字滤波器设计。第7章讨论有限冲激响应(FIR)数字滤波器设计,主要有窗函数设计法和频率采样设计法。

第8章为第三部分,介绍数字谱分析方法,包括确定性信号的谱分析方法和随机信号的谱分析方法,经典谱估计方法等,并简单介绍了一些其他的谱分析方法。

第9章为第四部分,简单介绍数字信号处理理论的应用,包括语音信号处理、通信信号处理、图像处理、软件无线电技术等。

第10章为第四部分,简单介绍MATLAB的应用基础,使学生对MATLAB程序设计语言有一个初步的了解,为有关实验做好准备。

对于电子信息工程、通信工程专业,本教材的参考学时数为54学时;其他专业的建议参考学时数为40学时,可以只讲前7章。

本书第1~4章以及第8章、第9章和第10章部分内容由吉林大学通信工程学院丛玉良教授执笔,第5~8章由长春工业大学计算机科学与工程学院王宏志教授执笔。长春理工大学许红梅副教授参与编写了第3章、第4章和第9章的部分内容;吉林大学的李莉副教授和李勇副教授参与编写了第5章、第6章和第7章的部分内容;长春大学李杰教授参与编写了第4章、第6章和第8章的部分内容;空军航空大学杨剑波副教授和吉林大学通信工程学院王本平

副教授参与编写了第9章;吉林大学通信工程学院田雨禾参与编写了第10章;吉林农业大学刘媛媛参与编写了第7章。王长冕、李石岗、王思宇、仲伟志、孙静、闫凌飞、吴浩勇、田君翌、张炎、何冠辰等同学参与了程序设计、仿真及绘图等工作。本书的习题解答或参考答案由刘媛媛、许红梅、李杰、伍逸枫等完成。

吉林大学通信工程学院赵晓晖教授在百忙之中仔细审阅了全书,并在本书的编写过程中提出了许多宝贵意见;电子工业出版社韩同平编辑为本书的出版给予了热心指导和帮助,在此一并表示衷心感谢。

由于编著者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

作者联系方式:910827070@qq.com

congyl@jlu.edu.cn

编 著 者

目 录

绪论	(1)
第1章 离散时间信号与系统的时域分析	(4)
1.1 离散时间信号——序列	(4)
1.1.1 序列的基本运算	(5)
1.1.2 常用典型序列	(7)
1.1.3 序列的周期性	(11)
1.1.4 任意序列的一般表示方法及序列的能量	(12)
1.2 线性时不变系统	(12)
1.3 离散卷积	(14)
1.4 常系数线性差分方程	(18)
1.5 物理可实现系统	(21)
本章小结	(24)
习题	(24)
第2章 离散时间信号与系统的 z 域分析和频域分析	(26)
2.1 z 变换的定义及收敛域	(26)
2.1.1 z 变换定义	(26)
2.1.2 z 变换的收敛域	(26)
2.2 z 反变换	(32)
2.2.1 留数法	(32)
2.2.2 幂级数展开法和长除法	(36)
2.2.3 部分分式展开法	(38)
2.3 z 变换性质	(40)
2.4 z 变换与其他变换之间的关系	(47)
2.4.1 z 变换与拉氏变换的关系	(47)
2.4.2 z 变换与序列傅里叶变换的关系	(49)
2.5 差分方程的 z 域解法	(51)
2.6 离散系统的系统函数和频率响应	(53)
2.6.1 系统函数	(53)
2.6.2 离散系统的因果性和稳定性	(54)
2.6.3 系统的频率响应	(55)
2.6.4 系统频率特性的几何确定法	(57)
本章小结	(59)
习题	(60)
第3章 离散傅里叶变换	(63)
3.1 离散傅里叶级数(DFS)	(63)
3.1.1 离散傅里叶级数	(63)

3.1.2 离散傅里叶级数的性质	(64)
3.2 离散傅里叶变换(DFT)	(70)
3.3 离散傅里叶变换的性质	(73)
3.3.1 线性特性	(73)
3.3.2 圆周位移特性	(73)
3.3.3 循环卷积特性	(75)
3.3.4 对称特性	(78)
3.3.5 相关特性	(79)
3.3.6 巴塞伐尔定理	(81)
3.4 离散傅里叶变换与其他变换之间的关系	(81)
3.5 线性卷积与线性相关的 DFT 算法	(83)
3.5.1 计算循环卷积和线性卷积	(83)
3.5.2 计算循环相关和线性相关	(86)
3.6 信号的描述方法	(87)
本章小结	(89)
习题	(89)
第4章 离散傅里叶变换的快速算法及其他变换	(91)
4.1 提高 DFT 运算速度的主要方法	(91)
4.2 时间抽选奇偶分解 FFT 算法	(93)
4.2.1 算法原理	(93)
4.2.2 运算量估计	(97)
4.2.3 按时间抽选 FFT 算法的特点	(99)
4.2.4 软件实现	(101)
4.3 频率抽选奇偶分解 FFT 算法	(101)
4.3.1 算法原理	(101)
4.3.2 频率抽选 FFT 算法的特点	(106)
4.3.3 软件实现	(108)
4.4 离散傅里叶反变换的快速计算方法	(108)
4.5 其他快速算法简介	(110)
4.5.1 复合数 FFT 算法	(110)
4.5.2 线性调频 z 变换算法	(111)
4.5.3 细化快速傅里叶变换法(ZOOM)	(114)
4.6 离散余弦变换	(114)
4.7 短时傅里叶变换	(116)
4.7.1 短时傅里叶变换的定义及其物理解释	(117)
4.7.2 短时傅里叶变换的性质	(118)
4.7.3 短时傅里叶变换的时间、频率分辨率	(119)
4.7.4 短时傅里叶变换的实现	(120)
4.8 FFT 实际应用举例	(122)
4.8.1 测量系统函数的振幅谱	(122)
4.8.2 测量相关函数(相关谱)	(122)

本章小结	(123)
习题	(123)
第5章 数字滤波器概论	(125)
5.1 数字滤波器的基本原理	(125)
5.2 数字滤波器的分类	(128)
5.3 IIR 数字滤波器结构	(129)
5.3.1 直接型	(129)
5.3.2 级联型	(131)
5.3.3 并联型	(133)
5.4 FIR 数字滤波器结构	(136)
5.4.1 直接型	(136)
5.4.2 级联型	(137)
5.4.3 频率抽样型	(138)
本章小结	(141)
习题	(141)
第6章 IIR 数字滤波器设计	(143)
6.1 模拟低通滤波器的设计方法	(144)
6.1.1 幅度平方函数	(144)
6.1.2 巴特沃思低通滤波器设计	(145)
6.1.3 切比雪夫低通滤波器设计	(147)
6.1.4 椭圆滤波器	(151)
6.2 冲激响应不变变换法	(152)
6.2.1 变换原理	(152)
6.2.2 混叠失真	(153)
6.3 双线性变换法	(155)
6.3.1 变换原理	(155)
6.3.2 逼近情况	(156)
6.3.3 冲激响应不变变换法与双线性变换法的比较	(159)
6.4 频带变换	(164)
6.4.1 模拟频带变换	(164)
6.4.2 数字频带变换	(164)
6.4.3 频带变换原理	(165)
6.4.4 其他原型变换法	(168)
6.5 IIR 数字滤波器的计算机优化设计	(169)
本章小结	(170)
习题	(171)
第7章 FIR 数字滤波器设计	(172)
7.1 线性相位 FIR 滤波器的特性	(172)
7.1.1 $h(n)$ 为偶对称情况	(173)
7.1.2 $h(n)$ 为奇对称情况	(174)
7.1.3 幅度函数的特点	(175)

7.1.4	零点位置	(178)
7.2	窗函数设计法	(178)
7.2.1	设计思想	(178)
7.2.2	加窗的影响	(181)
7.2.3	常用窗函数	(182)
7.2.4	窗函数法设计步骤	(186)
7.3	频率抽样设计法	(190)
7.3.1	设计思想	(190)
7.3.2	滤波器性能的改善	(195)
7.4	IIR 与 FIR 滤波器的比较	(196)
	本章小结	(197)
	习题	(197)
第 8 章	数字谱分析	(199)
8.1	确定性信号谱分析	(199)
8.1.1	数据预处理	(199)
8.1.2	用 $X(k)$ 近似表示频谱时的基本关系	(200)
8.1.3	用 FFT 分析确定性连续时间信号	(201)
8.1.4	谱分析参数选取	(204)
8.2	随机信号	(204)
8.2.1	基本概念	(204)
8.2.2	分布函数	(206)
8.2.3	数字特征	(206)
8.2.4	随机过程的分类	(208)
8.2.5	维纳 - 辛钦定理	(209)
8.3	功率谱估计	(210)
8.3.1	概述	(210)
8.3.2	谱估计的经典方法	(210)
8.3.3	谱估计质量评价方法	(211)
8.4	功率谱估计的自相关函数法	(212)
8.4.1	自相关函数的估计	(212)
8.4.2	自相关函数估计法	(215)
8.5	谱估计的周期图法	(217)
8.5.1	算法原理	(217)
8.5.2	估计质量	(218)
8.5.3	几种改进方法	(220)
8.5.4	各种功率谱估计方法的比较	(226)
8.6	离散随机信号通过线性时不变系统	(227)
8.6.1	输出随机信号的均值 m_y	(228)
8.6.2	输出随机信号的自相关函数 $r_{yy}(m)$	(228)
8.6.3	输出随机信号的功率谱 $P_{yy}(e^{j\omega})$	(229)
8.6.4	输入随机信号与输出随机信号的互相关函数 $r_{xy}(m)$	(229)

8.6.5 输出随机信号的方差	(230)
8.7 其他功率谱估计方法简介	(231)
8.7.1 最大似然谱估计(MVSE)	(232)
8.7.2 最大熵谱估计(MESE)	(232)
8.8 高阶谱估计	(234)
本章小结	(235)
习题	(235)
第9章 数字信号处理应用简介	(237)
9.1 语音增强算法	(237)
9.2 语音分析方法	(238)
9.3 图像数字化处理	(240)
9.4 软件无线电技术	(243)
9.5 CDMA 扩频通信	(244)
本章小结	(245)
第10章 MATLAB 简介	(246)
10.1 MATLAB 的应用窗口	(246)
10.1.1 桌面平台组件的几个重要窗口介绍	(246)
10.1.2 MATLAB 的搜索路径	(248)
10.1.3 MATLAB 帮助系统	(249)
10.2 数据和函数的可视化	(249)
10.3 MATLAB 基本程序控制语句	(252)
10.4 数字信号处理常用 MATLAB 函数简介	(253)
10.4.1 典型离散信号的表示方法	(253)
10.4.2 滤波器分析与实现	(254)
10.4.3 信号变换	(256)
10.4.4 IIR 数字滤波器设计及模拟低通滤波器设计	(257)
10.4.5 FIR 数字滤波器设计	(258)
10.4.6 数字谱分析	(259)
本章小结	(261)
部分习题解答或参考答案	(262)
参考文献	(282)

绪 论

数字信号处理(Digital Signal Processing)是一门新兴学科,它研究用数字方式进行信号处理,即利用数字计算机或专用数字处理设备对信号进行分析、变换、综合、滤波、估计与识别等处理。随着大规模集成电路和计算机技术的迅猛发展,数字信号处理技术已广泛应用于通信、语音、雷达、地震预报、声呐、遥感、生物医学、电视、控制系统、水利工程、故障检测、仪器仪表等领域,对许多学科的发展起到了重大的推动作用。

1. 数字信号处理系统的基本组成

客观世界存在着大量的模拟信号,在工程中大量地使用“数字系统”来处理模拟信号。处理模拟信号的典型系统如图 0-1 所示,显然它是一个模拟和数字的混合系统,一般称其为数字信号处理系统。图 0-1 中模拟信号 $x(t)$ 经 A/D 变换器抽样(抽样周期为 T)后成为仅在一系列时间点 $0, 1T, 2T, \dots, nT$ 上有定义的等间隔的离散时间信号 $x(nT)$ 。实际上,抽样过程即是对模拟信号的时间量化过程。然后,在 A/D 变换器的保持电路中将抽样信号 $x(nT)$ 进行幅度量化(如 8 位 A/D 变换器,只能表示 $2^8 = 256$ 种不同的信号幅度,这时信号幅度用量化电平表示),当离散时间信号幅度与量化电平不相同,就要以最接近的一个量化电平来近似它。因此,模拟信号经 A/D 变换器后,不但时间量化了,而且幅度也量化了,这种信号便称为数字信号,它是数的序列,可用 $x(n)$ 来表示,每个数用有限个二进制数码表示。一般地,将数字信号存储在数字信号处理器的存储器中,成为按顺序排列的数组。序列 $x(n)$ 可由抽样时间信号产生,也可以由其他非时间信号产生,这使得数字信号处理技术适用于更广泛的领域。

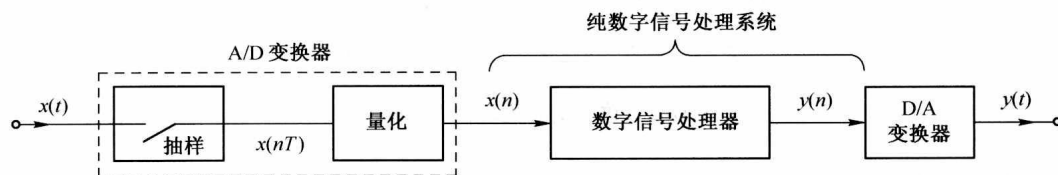


图 0-1 数字信号处理系统

图 0-1 中的数字信号处理器是数字信号处理系统的核心部分,其输入是数字信号 $x(n)$,在处理器中对信号进行加工处理,得到输出数字信号 $y(n)$ 。然后, $y(n)$ 通过 D/A 变换器,将数字序列变换成模拟信号 $y(t)$,这些信号在时间点 $0, 1T, 2T, \dots, nT$ 上的幅度应等于序列 $y(n)$ 中相应数码所代表的数值大小。

图 0-1 讨论的是处理模拟信号的数字系统。在实际应用中,输入端还需加抗混叠滤波器,其作用是将输入信号中高于某一频率(称折叠频率,等于抽样频率的一半)的分量加以滤除,以避免频谱混叠。在输出端需加低通滤波器,以滤除掉不必要的高频分量,平滑所需的模拟输出信号。此外,实际系统并不一定包括图 0-1 中的所有部分,如某些系统只需数字输出,那么就不需要 D/A 变换器。另一些系统,其输入是数字信号,因而就不需要 A/D 变换器。对于纯数字系统,则只需要数字信号处理器这一核心部分。

2. 数字信号处理的学科概貌

数字信号处理的学科概貌如图 0-2 所示。其中离散时间线性时(移)不变系统理论和离散傅里叶变换是数字信号处理领域的理论基础。而数字滤波和频谱分析是数字信号处理理论的两个主要学科分支。

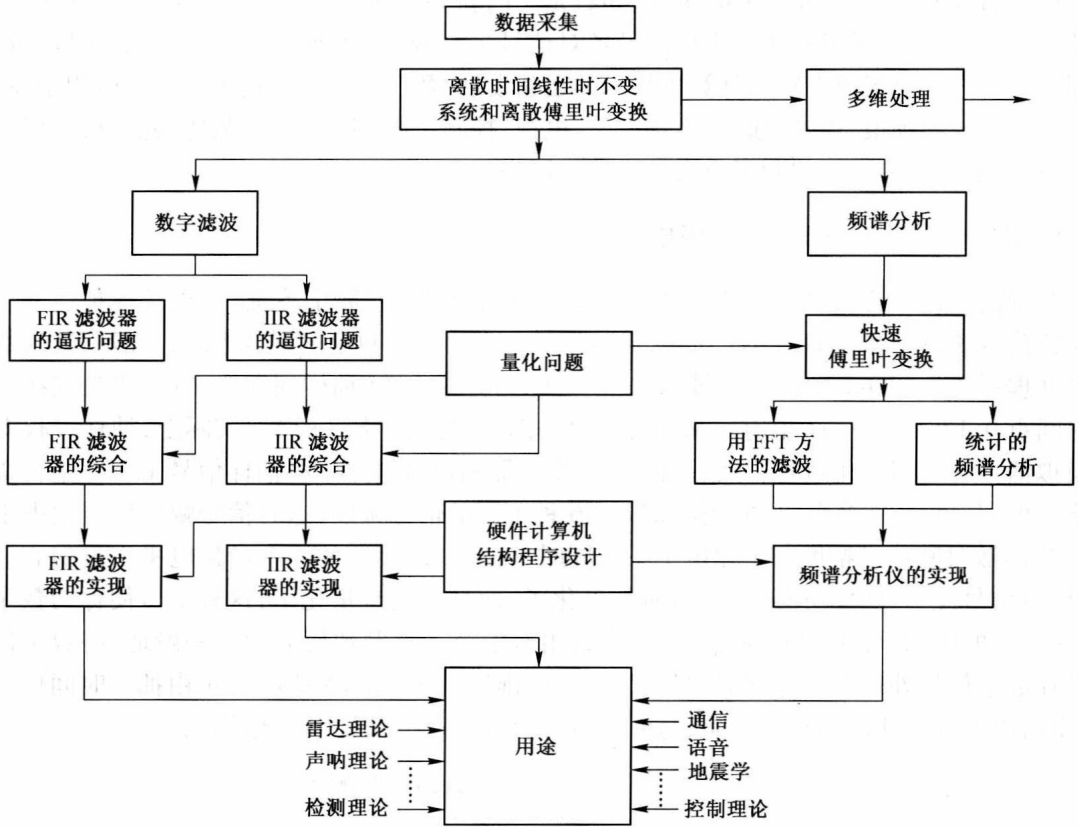


图 0-2 数字信号处理的学科概貌

数字信号处理学科包含：

- 信号的采集,包括 A/D、D/A 技术,抽样、多率抽样,量化噪声分析等。
- 离散信号的分析,包括时域及频域分析,离散傅里叶变换理论。
- 离散时间线性时不变系统分析。
- 数字滤波技术。
- 信号的建模,包括 AR, MA, ARMA, PRONY 等各种模型。
- 信号估计理论,包括相关函数估计及功率谱估计等。
- 谱分析理论,包括高阶谱分析等。
- 自适应信号处理。
- 信号处理中的特殊算法,如同态处理、奇异值分解及信号重建等。
- 数字信号处理的实现。
- 数字信号处理的应用。

3. 数字信号处理系统的特点

与模拟信号处理系统相比,数字信号处理具有以下优点:

(1) 精度高。模拟信号处理系统中元器件的精度很难达到 10^{-3} 以上,而数字信号处理系统只要 17 位字长就可达到 10^{-5} 的精度,可获得高性能指标。

(2) 灵活性强。通过修改存储器中数字信号处理系统的系数值,就可以得到不同的系统,比改变模拟系统方便得多。

(3) 可靠性好。模拟信号处理系统元器件的各种参数都受到温度的影响,随环境条件的变化而变化,并且容易出现电磁感应、杂散效应。而数字信号处理系统由性能一致、为数不多的大规模集成电路芯片构成,只有两个信号电平“0”、“1”,因此受周围环境温度及噪声的影响较小,可靠性好。

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

(5) 时分复用。将各路输入信号接至一个多路开关,在同步器控制下,按一定的时间顺序依次进行 A/D 变换和数字处理,各路处理结果用位于输出端的分路器按相同的时间顺序分离开来,分别输出。时分复用使设备利用率提高、成本降低。

(6) 多维处理。利用庞大的存储单元,可以存储一帧或数帧图像信号,实现二维甚至多维信号的处理,包括二维或多维滤波、二维及多维谱分析等。

由于数字信号处理具有许多突出的优点,因而它在许多领域都得到了广泛的应用。

4. 数字信号处理系统的应用

近年来,数字信号处理正以崭新的面貌出现在科学技术的各个领域,在雷达、声呐、地震学、语音处理、数据通信及生物医学信号处理等众多领域具有广泛的应用。它综合了系统理论、统计学、数值分析、计算机科学和超大规模集成电路等学科的理论和技术,而独立地形成成为一门具有普遍意义的学科,在我们所面临的信息革命中起着重要的作用。可以说,信号处理几乎涉及所有的工程技术领域。

- 信号变换与滤波:包括数字滤波、卷积、相关、希尔伯特(Hilbert)变换、快速傅里叶变换(FFT)、自适应滤波等。
- 语音信号处理:包括语音邮件、语音识别、语音压缩编码、语音合成、语音增强等。
- 图形和图像处理:包括图像变换、图像复原、图像重建、图像压缩、图像增强、模式识别、计算机视觉、图像分割等。
- 自动控制:包括机器人控制、伺服控制等。
- 仪器:包括频谱分析仪、函数发生器、锁相环、地震信号处理器、瞬态分析仪等。
- 通信:包括各种调制解调技术、自适应均衡、纠错编码、信道复用、移动通信、卫星通信、数据加密和解密技术等。
- 医疗:各种医疗仪器等。
- 军事:包括雷达信号处理、声呐信号处理、航空航天测试、天线、定位系统等。

第 1 章 离散时间信号与系统的时域分析

本章主要讨论离散时间信号和离散时间系统的基本概念,重点研究线性时不变离散系统。首先介绍离散时间信号序列,然后分析线性时不变系统的特点及描述该系统的两种方法——离散卷积和常系数差分方程。

1.1 离散时间信号——序列

信号是信息的载体,它可以传递不同的信息。信号处理泛指对信号的各种加工、变换。在数字信号处理中,信号是用有限精度的数的序列来表示的,而用数字运算来实现。科研和工程实际中经常需要进行信号处理,以提取、利用信号中携带的有用信息。

根据信号的不同特点,它可以表示成一维变量或多维变量的函数。例如,语音信号可以表示为时间的函数,而静止图像可以表示为两个空间变量的亮度函数,视频图像是三维信号,传感器阵列也是多维信号。一维变量可以是时间,也可以是其他参量,习惯上将其看成是时间。

一维信号可以有以下几种不同形式:

(1) 连续时间信号:在连续时间范围内有定义的信号,信号的幅值可以是连续数值,也可以是离散数值。幅值和时间都连续的信号又称为模拟信号。实际上连续时间信号与模拟信号在概念上常常通用。

(2) 离散时间信号:时间变量离散化的信号。连续时间信号经过抽样,就可以得到离散时间信号。通常抽样时间间隔是均匀的,所以得到的信号可以称为等间隔离散时间信号。

(3) 数字信号:时间和幅值都离散化的信号。

对于离散时间信号,它只在一系列互相分离的时间点上有定义,而在其他时间点上无定义。若抽样周期为 T ,则可用 $x(nT)$ 表示离散时间信号在 nT 点上的值, n 为整数。在离散时间信号的传输与处理设备中,常把 $x(nT)$ 放在存储器中,供随时取用。

离散时间信号处理常常是非实时的,即先记录数据后分析,或短时间内存入,在较长时间后才能完成对数据的分析处理。所以,所谓 $x(nT)$ 仅仅是存储器中按一定顺序排列的一组数。因此,往往不用 nT 作为变量,直接用 $x(n)$ 表示第 n 个离散时间点的值,而将序列表示成 $\{x(n)\}$ 。但为了方便,常将 $\{x(n)\}$ 简单表示为 $x(n)$,不用加注括号。

离散时间信号——序列 $x(n)$ 可由连续时间信号抽样获得。但 $x(n)$ 具有更加广泛的意义,它不但可以表示时间信号,也可以表示非时间信号,例如某一时刻,全国各城市的气温就不是一个按时间顺序排列的序列。

对于 $x(n)$ 来说, n 应为整数。若 n 为非整数,则 $x(n)$ 毫无意义。 $x(n)$ 常用图形表示,如图 1-1 所示。图中线段长短表示序列数值的大小。

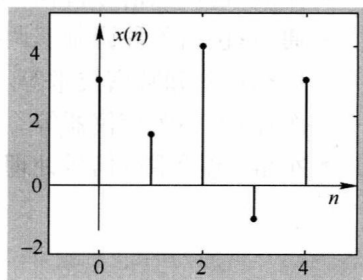


图 1-1 离散时间信号

1.1.1 序列的基本运算

与连续时间信号的运算规则类似,离散时间信号也有相应的运算规则。下面讨论序列的几种基本运算及运算规则。

1. 序列相加

序列 $x(n)$ 与序列 $y(n)$ 之和,是指两个序列同序号的数值逐项相加而构成一个新的序列 $z(n)$,表示为

$$z(n) = x(n) + y(n)$$

【例 1.1】 已知

$$x(n) = \begin{cases} 2^{-n} + 5 & n \geq -1 \\ 0 & n < -1 \end{cases}$$

$$y(n) = \begin{cases} n + 2 & n \geq 0 \\ 3(2^n) & n < 0 \end{cases}$$

求 $x(n)$ 与 $y(n)$ 之和。

解:

$$z(n) = x(n) + y(n) = \begin{cases} 2^{-n} + n + 7 & n \geq 0 \\ 17/2 & n = -1 \\ 3(2^n) & n < -1 \end{cases}$$

2. 序列相乘

序列 $x(n)$ 与序列 $y(n)$ 相乘,表示同序号的数值逐项对应相乘而构成一个新的序列 $z(n)$,表示为

$$z(n) = x(n)y(n)$$

【例 1.2】 对于例 1.1 中序列 $x(n)$ 、 $y(n)$,求 $z(n) = x(n)y(n)$ 。

解:

$$z(n) = x(n)y(n) = \begin{cases} n2^{-n} + 2^{-n+1} + 5n + 10 & n \geq 0 \\ 21/2 & n = -1 \\ 0 & n < -1 \end{cases}$$

【例 1.3】 已知序列

$$x_1(n) = \sin(\omega_0 n) \quad \omega_0 = \pi/20, -20 \leq n \leq 20;$$

$$x_2(n) = a^n \quad a = 1.05, -20 \leq n \leq 20;$$

分别求两序列相加及相乘

$$y_1(n) = x_1(n) + x_2(n)$$

$$y_2(n) = x_1(n)x_2(n)$$

下面给出两序列相加及相乘的 MATLAB 实现程序及图形(见图 1-2)。

```
w0 = pi/20; a = 1.05;
```

```
n1 = [-20:20]; n2 = [-20:20];
```

```

subplot(2,2,1),stem(n1,sin(w0.*n1),'k');axis([-20,20,-1,3]);
subplot(2,2,2),stem(n2,a.^n2,'k');axis([-20,20,-1,3]);
n=[min(min(n1),min(n2));max(max(n1),max(n2))];
x1=zeros(1,length(n));
x2=zeros(1,length(n));
x1([find((n>=min(n1))&(n<=max(n1))))]=sin(w0.*n1);
x2([find((n>=min(n2))&(n<=max(n2))))]=a.^n2;
y1=x1+x2;
y2=x1.*x2;
subplot(2,2,3);stem(n,y1,'k');axis([-20,20,-1,3]);
subplot(2,2,4);stem(n,y2,'k');axis([-20,20,-1,3]);

```

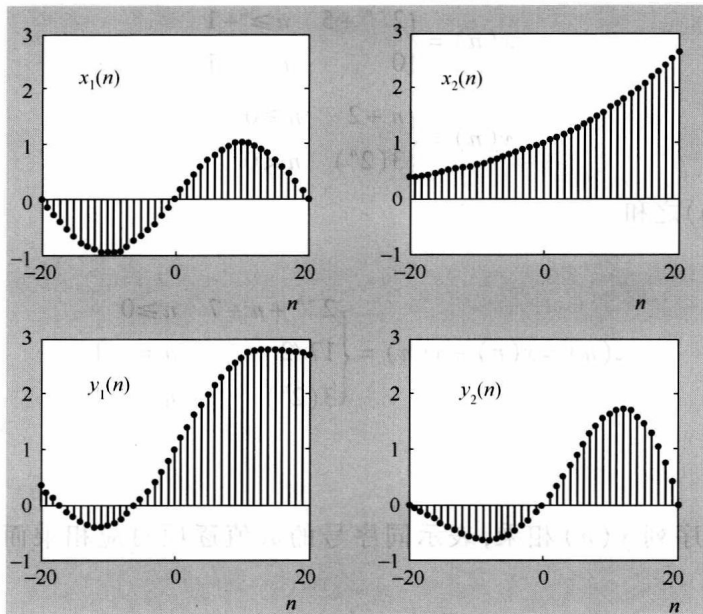


图 1-2 序列相加及相乘

3. 序列移位(延迟)

设某一序列为 $x(n]$, 则 $x(n+m)$ 为原序列 $x(n]$ 逐项依次左移 m 位而得的一个新序列, $x(n-m)$ 为原序列 $x(n]$ 逐项依次右移 m 位而得的一个新序列, 其中 m 为正整数。

【例 1.4】 设 $x(n) = \{1, 2, 3, 4, 5, 5, 4, 3, 2, 1\}$ 且 $n = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$, 下面给出序列 $x(n)$ 及其移位 $x(n-2)$ 、 $x(n+2)$ 的 MATLAB 实现程序及图形(见图 1-3)。

```

n1=[0:9];
x=[1,2,3,4,5,5,4,3,2,1];
subplot(3,1,1);stem(n1,x,'b');axis([-3,12,0,5])
n2=n1-2;
subplot(3,1,2);stem(n2,x,'b');axis([-3,12,0,5])
n3=n1+2;
subplot(3,1,3);stem(n3,x,'b');axis([-3,12,0,5])

```

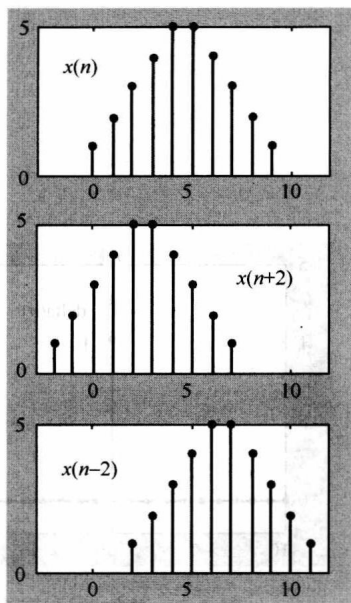


图 1-3 序列 $x(n)$ 及其移位 $x(n-2)$ 、 $x(n+2)$

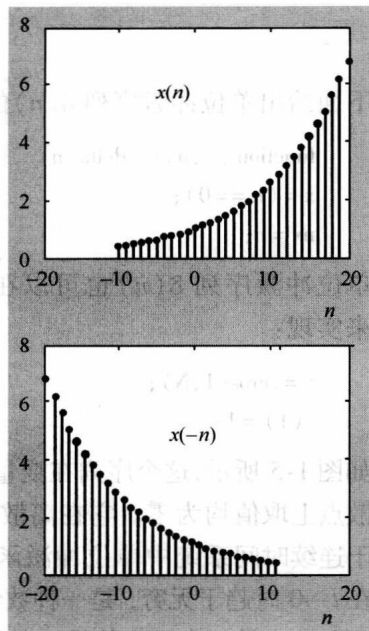


图 1-4 序列 $x(n)$ 及其反褶序列 $x(-n)$

4. 序列反褶

如果序列为 $x(n)$, 则 $x(-n)$ 是以 $n=0$ 的纵轴为对称轴将序列 $x(n)$ 加以反褶。

【例 1.5】 已知序列

$$x(n) = \begin{cases} 2^n + 5 & n \geq 1 \\ 0 & n < 1 \end{cases}$$

求 $x(n)$ 的反褶序列。

解: $x(n)$ 的反褶序列为

$$x(-n) = \begin{cases} 2^{-n} + 5 & n \leq -1 \\ 0 & n > -1 \end{cases}$$

设 $x(n) = a^n, a = 1.1, -10 \leq n \leq 20$, 下面给出序列 $x(n)$ 及其反褶序列 $x(-n)$ 的 MATLAB 实现程序及图形(见图 1-4)。

```
a = 1.1;
n = [-10:20]; x = a.^n;
subplot(2,1,1); stem(n,x,'k'); axis([-20,20,0,8])
n = fliplr(-n); x = fliplr(x);
subplot(2,1,2); stem(n,x,'k'); axis([-20,20,0,8])
```

1.1.2 常用典型序列

1. 单位冲激序列(单位抽样序列)

单位冲激序列用符号 $\delta(n)$ 表示, 定义为