



全国教育科学“十一五”规划课题研究成果



浙江省重点教材建设项目

数字信号处理 ——原理、实现与仿真

唐向宏 孙闽红 编著

第2版



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS



全国教育科学“十一五”规划课题研



浙江省重点教材建设项目

数字信号处理 ——原理、实现与仿真

Shuzi Xinhao Chuli—Yuanli, Shixian yu Fangzhen

唐向宏 孙闽红 编著

第2版



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书系统讨论数字信号处理的基本理论、基本算法和基本实现方法,注重基本概念、基本方法的讲解,压缩了繁琐的理论推导,所列举的大量典型示例注重理论联系实际,例题、习题紧扣基本概念、基本原理、基本方法的应用,内容通俗易懂、易教易学。

全书共9章,主要涉及离散时间系统的基本特征、连续时间信号的抽样、离散时间系统的变换域分析方法、离散时间系统结构、快速傅里叶变换(FFT)、IIR和FIR数字滤波器的理论和设计方法,以及多抽样率信号处理与多分辨率信号分析等内容。结合各章节的内容,介绍了相应的MATLAB信号处理工具箱函数,给出有关的仿真程序。

本书可作为大专院校电气信息类专业的教材,也可作为在通信工程、电子信息工程、自动控制工程、图像处理、语音处理等领域从事信号处理的科技工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理:原理、实现与仿真/唐向宏,孙闽红编著. --2版. --北京:高等教育出版社,2012.8
ISBN 978-7-04-035883-4

I. ①数… II. ①唐… ②孙… 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(2012)第168845号

策划编辑 吴陈滨	责任编辑 吴陈滨	特约编辑 李宏言	封面设计 赵阳
版式设计 范晓红	插图绘制 杜晓丹	责任校对 杨雪莲	责任印制 韩刚

出版发行 高等教育出版社	网 址 http://www.hep.edu.cn
社 址 北京市西城区德外大街4号	http://www.hep.com.cn
邮政编码 100120	网上订购 http://www.landaco.com
印 刷 高教社(天津)印务有限公司	http://www.landaco.com.cn
开 本 787mm×1092mm 1/16	
印 张 21	版 次 2006年12月第1版
字 数 500千字	2012年8月第2版
购书热线 010-58581118	印 次 2012年8月第1次印刷
咨询电话 400-810-0598	定 价 32.80元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 35883-00

第二版前言

本书是全国教育科学“十一五”规划课题研究成果,为应用型本科院校电子电气类专业基础平台课教材,2010年被列为浙江省重点教材建设项目。教材从2006年出版至今,被多所院校使用,受到广大师生好评,已连续印刷多次。

根据读者的建议,并结合数字信号处理课程的教学特点,我们在第1版的基础上,对原有的教学内容作了调整、补充和完善,增加了“多抽样率信号处理与多分辨率信号分析”一章内容。该章主要介绍对离散时间信号进行抽样率转换的抽取和内插方法,抽取滤波器与内插滤波器的设计与实现方法,正交镜像滤波器组的基本概念和设计方法,以及离散小波变换等内容。修订后的教材在保持原教材特点的基础上,更加系统地介绍数字信号处理的基本理论,注重基本概念、基本方法的讲解,压缩繁琐的理论推导;加强了实践环节,例题和习题增多;内容深入浅出,通俗易懂,易教易学。

全书共9章,第1~7章由唐向宏负责修订,第8~9章以及书中的MATLAB程序由孙闻红负责增补和修订。全书由唐向宏统稿。

感谢使用本教材的读者,是你们的关心、支持和宝贵建议,才使本书得以完善,殷切希望新老读者一如既往地关心和支持本教材。

编著者

于杭州电子科技大学

2012年3月

第一版前言

随着信息科学和计算机技术的日新月异,数字信号处理的理论与应用迅速发展,形成一门极其重要的学科。数字信号处理已成为大专院校电气信息类专业的一门重要专业基础课,目的是让学生掌握数字信号处理的基本理论、基本分析方法和基本实现方法。

数字信号处理课程是一门理论性较强的课程,所涉及的内容需要繁琐的数学推导,学生在学习过程中往往感觉抽象,难以理解和掌握。本书作者结合多年从事数字信号处理课程教学的经验,在吸取国内外许多优秀的数字信号处理教材精髓的基础上,以培养应用型人才为基本目的,以“实用、适用、够用”为基本原则,编写了本书。本书对本课程涉及的基本原理、基本性质、基本方法力求讲全、讲透,概念准确清晰,不片面追求理论的深度和内容的广度,保证授课对象在实践中“理论够用”。本教材主要有以下特点:

(1) 选材精练,突出基本原理、基本概念与基本分析方法。

(2) 各章节涉及的理论与方法与 MATLAB 进行适当的结合。

作为国际公认的信号处理标准软件和仿真开发平台, MATLAB 可以使一些很难理解的抽象理论得到直观演示解释,还可以解决各种复杂问题的分析与计算等难题。本书各章节的基本原理和方法,均使用 MATLAB 释疑和仿真,给出了大量的实例与 MATLAB 仿真程序,以便帮助学生更好地理解 and 掌握数字信号处理的基本理论和基本实现方法。

(3) 例题多,习题多,注重理论联系实际。

大量的举例有利于帮助学生理解和掌握书中的基本理论和方法,培养学生分析问题和解决问题的能力。结合多年的教学实践经验,在参考了国内外优秀相关教材的基础上,各章节重要和比较难理解的内容均有举例,同时给出了大量的练习题。

(4) 内容通俗易懂,易学易教。

压缩了繁琐的理论推导,注重基本概念、基本方法的讲解,力求做到简明、清晰和准确。在推导公式过程中尽量讲清物理概念、分析方法和推导公式的思路。

全书共 8 章,第 1 章着重阐述离散时间信号的表示、运算,离散系统的特征以及连续时间信号的抽样等内容;第 2 章主要论述离散系统的变换域分析方法—— z 域分析,主要涉及 z 变换与 z 逆变换、离散系统的系统函数、系统的频率响应与系统类型以及 IIR 和 FIR 数字滤波器的基本特点等内容;第 3 章着重讨论离散系统的频域分析——傅里叶变换,主要涉及非周期序列的傅里叶变换、周期序列的离散傅里叶级数(DFS)以及有限长序列的傅里叶变换(DFT);第 4 章讨论离散系统的结构;第 5 章讨论各种快速傅里叶变换(FFT);第 6 章和第 7 章主要讨论 IIR 和 FIR 数字滤波器的理论和设计方法;第 8 章结合前 7 章所学内容,讨

论了离散信号处理系统设计以及数字信号处理的有限字长效应。最后,在附录中介绍了 MATLAB 使用方法。

承蒙杭州电子科技大学赵知劲教授审阅本书稿,在此表示感谢。

由于编写时间仓促,不足之处在所难免,殷切希望广大读者批评指正。

编著者

于杭州电子科技大学

2006 年 6 月

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》,其行为人将承担相应的民事责任和行政责任;构成犯罪的,将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序,保护读者的合法权益,避免读者误用盗版书造成不良后果,我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为,希望及时举报,本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010)58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010)82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目 录

绪论	1
第 1 章 离散时间信号与系统	4
1.1 离散时间信号与序列运算	4
1.1.1 离散时间信号及表示方式	4
1.1.2 序列的运算	5
1.1.3 序列的能量、周期性以及几种常用序列	10
1.2 离散时间系统	15
1.2.1 线性时不变系统	15
1.2.2 单位冲激响应与系统响应	16
1.2.3 因果与稳定系统	21
1.3 连续时间信号的抽样	23
1.3.1 连续时间信号抽样的基本原理	23
1.3.2 抽样定理与连续信号的恢复	25
1.4 本章相关的 MATLAB 命令及应用	29
1.4.1 离散时间信号的 MATLAB 表示	29
1.4.2 离散时间信号运算的实现	30
1.4.3 差分方程的 MATLAB 求解	35
1.4.4 连续信号的离散与重构	36
小结	39
习题	40
第 2 章 离散时间系统的变换域分析—— z 变换	45
2.1 z 变换与 z 逆变换	45
2.1.1 z 变换的定义与收敛域	45
2.1.2 z 逆变换	51
2.1.3 z 变换的基本性质	58
2.2 离散时间系统的系统函数与系统特性的描述	65
2.3 系统的频率响应与系统滤波特性	68
2.4 z 变换和拉氏变换的关系	72
2.5 本章相关的 MATLAB 命令及应用	74
2.5.1 z 变换与 z 逆变换的 MATLAB 实现	74
2.5.2 有理多项式的部分分式展开与多项式的乘除	75
2.5.3 MATLAB 对系统的描述及各系统模型的转换	77
2.5.4 离散 LTI 系统的时域响应与频率响应	81
小结	84
习题	85

第3章 离散时间系统的频域分析——傅里叶变换	88
3.1 非周期序列的傅里叶变换及性质	88
3.1.1 非周期序列傅里叶变换	88
3.1.2 非周期序列傅里叶变换的性质	90
3.2 周期序列的离散傅里叶级数(DFS)及性质	94
3.3 有限长序列的离散傅里叶变换(DFT)	98
3.3.1 离散傅里叶变换(DFT)及性质	98
3.3.2 圆周卷积与有限长序列的线性卷积的关系	108
3.4 频域抽样理论	111
3.5 利用DFT对连续时间信号处理时应注意的问题	114
3.5.1 混叠失真与参数选择	114
3.5.2 频谱泄漏	118
3.5.3 栅栏效应	118
3.6 本章相关的MATLAB命令及应用	121
3.6.1 求系统幅度响应函数与相位响应函数	121
3.6.2 傅里叶变换的MATLAB实现	122
小结	126
习题	126
第4章 数字滤波器的基本结构	130
4.1 数字滤波器类型及结构表示方法	130
4.2 无限长单位冲激响应(IIR)数字滤波器的基本结构与特点	131
4.3 有限长单位冲激响应(FIR)数字滤波器的基本结构与特点	137
4.4 数字滤波器的格型结构	139
4.4.1 全零点FIR系统的格型结构	139
4.4.2 全极点IIR系统的格型结构	141
4.4.3 零极点IIR系统的格型结构	143
4.5 本章相关的MATLAB命令及应用	144
4.5.1 系统互联函数命令	145
4.5.2 系统不同结构的实现	146
4.5.3 系统格型结构的实现函数	149
小结	150
习题	151
第5章 快速傅里叶变换	154
5.1 快速计算DFT的改进途径	154
5.2 按时间抽选(DIT)的基-2FFT算法	155
5.2.1 DIT-FFT算法的基本原理	155
5.2.2 DIT-FFT算法的特点	159
5.2.3 按时间抽选的FFT算法的其他形式流程图	162
5.3 按频率抽选(DIF)的基-2FFT算法	163
5.3.1 DIF-FFT算法的基本原理	163

5.3.2	DIF-FFT 算法的特点	165
5.4	离散傅里叶逆变换 (IDFT) 的快速算法	167
5.5	数字信号处理的 FFT 实现	168
5.5.1	线性卷积的 FFT 算法实现	168
5.5.2	线性相关的 FFT 算法实现	174
* 5.6	线性调频 z 变换 (Chirp- z 变换) 算法	175
5.6.1	基本原理	175
5.6.2	线性调频 z 变换的快速算法	176
5.7	本章相关的 MATLAB 命令及应用	177
小结		181
习题		181
第 6 章	无限长单位冲激响应 (IIR) 数字滤波器的设计方法	183
6.1	数字滤波器的设计步骤	183
6.1.1	理想数字滤波器的性能特性	183
6.1.2	数字滤波器的技术指标	184
6.1.3	数字滤波器设计的一般步骤	185
6.2	模拟滤波器的数字化设计 IIR 数字滤波器	185
6.2.1	冲激响应不变法	186
6.2.2	双线性变换法	191
6.3	频率变换法设计 IIR 数字滤波器——模拟域频率变换法	196
6.3.1	模拟低通滤波器变换成数字低通滤波器	197
6.3.2	模拟低通滤波器变换成数字高通滤波器	198
6.3.3	模拟低通滤波器变换成数字带通滤波器	201
6.3.4	模拟低通滤波器变换成数字带阻滤波器	204
6.4	频率变换法设计 IIR 数字滤波器——数字域频率变换法	207
6.5	本章相关的 MATLAB 命令及应用	212
6.5.1	冲激响应不变法设计函数	212
6.5.2	双线性变换法设计函数	213
6.5.3	频率变换设计法设计函数	214
小结		219
习题		219
第 7 章	有限长单位冲激响应 (FIR) 数字滤波器的设计方法	223
7.1	线性相位 FIR 数字滤波器的特点	223
7.1.1	FIR 数字滤波器具有线性相位的条件	223
7.1.2	线性相位 FIR 数字滤波器的幅度特点	226
7.1.3	线性相位 FIR 数字滤波器零点分布特点	229
7.2	FIR 数字滤波器的窗函数设计法	229
7.2.1	设计原理	229
7.2.2	窗函数设计法的截断效应	231
7.2.3	常用窗函数及选取原则	233

7.2.4 窗函数法设计步骤	236
7.3 频率抽样法设计 FIR 数字滤波器	239
7.3.1 设计原理	239
7.3.2 频率抽样法的优化设计	240
7.3.3 线性相位与抽样的约束	241
7.3.4 频率抽样法的设计步骤	242
7.4 IIR 与 FIR 数字滤波器的比较	245
7.5 本章相关的 MATLAB 命令及应用	246
7.5.1 窗函数设计法的相关函数	246
7.5.2 频率抽样法设计函数	248
7.5.3 其他方法设计 FIR 数字滤波器的相关函数	252
小结	254
习题	254
第 8 章 多抽样率信号处理与多分辨率信号分析	256
8.1 离散时间信号的抽取与内插	256
8.1.1 抽取与内插的时域描述	256
8.1.2 抽取与内插的频域描述	257
8.2 抽取滤波器与内插滤波器	258
8.2.1 抽取滤波器	258
8.2.2 内插滤波器	259
8.2.3 有理数倍抽样率转换	260
8.2.4 抽取滤波器的 FIR 结构和多相结构	260
8.2.5 内插滤波器的 FIR 结构和多相结构	261
8.3 正交镜像滤波器组	263
8.3.1 数字滤波器组	263
8.3.2 正交镜像滤波器组	263
*8.4 离散小波变换	265
8.4.1 连续小波变换	266
8.4.2 二进小波变换与多分辨率分析	266
8.4.3 Mallat 小波快速算法	268
8.5 本章相关的 MATLAB 命令及应用	271
8.5.1 时域和频域抽样率的改变	272
8.5.2 抽取器与内插器的设计	273
8.5.3 滤波器组的设计	274
8.5.4 离散小波变换与重构	275
小结	276
习题	277
第 9 章 离散信号处理系统设计分析及有限字长效应	278
9.1 离散信号处理系统的设计分析与仿真	278
9.1.1 离散信号处理系统的设计步骤	278

9.1.2 离散信号处理系统设计分析实例	279
9.2 数字信号处理中的有限字长效应	283
9.2.1 二进制数的表示及误差基本概念	283
9.2.2 定点制表示的量化误差	285
9.2.3 A/D 转换的量化效应	288
9.2.4 数字滤波器的系数量化效应	289
9.2.5 FFT 算法的有限字长效应	293
9.3 本章相关的 MATLAB 命令及应用	295
9.3.1 A/D 转换量化噪声分析	295
9.3.2 系数量化效应	296
小结	298
习题	298
附录 A 常用模拟低通滤波器设计方法	299
一、由幅度平方函数确定系统函数	299
二、巴特沃思低通逼近法	299
三、切比雪夫低通逼近法	305
四、椭圆滤波器	306
附录 B MATLAB 使用简介	307
一、MATLAB 的工作环境	307
二、MATLAB 的基本语法	310
2.1 变量及其赋值	310
2.2 运算符、复数运算及流程控制	312
2.3 基本数学函数	313
2.4 基本绘图命令与画图方法	314
三、MATLAB 的基本操作命令与程序调试	320
参考文献	322

绪 论

数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)是利用计算机或专用数字信号处理设备、采用数值计算方法对信号进行处理的一门学科,它包括数据采集和应用。数字信号处理应用非常广泛,涉及语音、雷达、地震、图像处理、通信系统、系统控制等众多领域。自从1965年库利(Cooley)和图基(Tukey)在“计算数学”(Mathematics of Computation)上发表了“用机器计算复序列傅里叶级数的一种算法”即“快速傅里叶变换算法”以来,一门新兴学科——数字信号处理的发展就拉开了序幕。随着信息科学、计算机科学以及电子技术的高速发展,数字信号处理学科得以蓬勃发展,逐渐形成了自己的学科领域和一整套较为完整的理论体系,现在已经成为一门极其重要的独立学科。

信号是信息的载体,是信息的物理表现形式,通常定义为一个自变量或几个自变量的函数。根据自变量的多少,信号分为一维信号(如语音信号)和多维信号(如图像信号)。对一维信号,人们习惯用时间变量来刻画。按时间变量取值形式,信号可分为连续时间信号和离散时间信号。连续时间信号也称为模拟信号,如将离散时间信号的幅度量化,就成为数字信号。处理模拟信号的系统称为模拟信号处理系统,用于处理数字信号的系统称为数字信号处理系统。

通常,数字信号处理系统由 A/D 转换器、数字信号处理器、D/A 转换器三大部分组成,如图 0-1 所示。A/D 转换器(亦称为模数转换器)的功能就是将模拟信号 $x_a(t)$ 转换成数字信号序列 $x(n)$,通常由抽样、量化等过程来完成。为了避免抽样出现频谱混叠现象,在这一转换之前,通常将模拟信号经过一个前置预滤波器,模拟信号 $x_a(t)$ 中高于某一频率(称为折叠频率,等于抽样频率的一半)的分量被滤除。数字信号处理器的功能就是将数字信号序列按预定的要求进行加工处理,得到新的数字信号序列 $y(n)$,而 D/A 转换器(亦称为数模转换器)则是将数字信号序列 $y(n)$ 转换成模拟信号 $y_a(t)$ 。在数字信号处理系统中,数字信号处理器是数字信号处理系统的核心部分,它可以是数字计算机、微处理机、数字信号处理芯片(如 TI(Texas Instruments)公司的 TMS 320 系列芯片)或由数字硬件组成的专用处理设备。

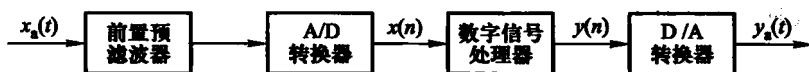


图 0-1 数字信号处理系统的简单方框图

数字信号处理的实现方法一般分为软件实现、专用硬件实现和软/硬件结合实现三种方法。

(1) 软件实现:在通用计算机或微处理机上编程序实现各种复杂的处理算法。程序可以由处理者开发,也可以使用已有的现成信号处理程序。软件处理的最大优点是灵活,开发周期短,其缺点是处理速度慢,所以多用于处理算法研究、教学实验和一些对处理速度要求较低的场合。

(2) 专用硬件实现:利用加法器、乘法器和延时器构成的专用数字信号处理机,或用专用集成电路实现某种专用的数字信号处理芯片,如快速傅里叶变换芯片、数字滤波器芯片等。这种实现方法的主要优点是处理速度快,缺点是不灵活,开发周期长,适用于要求高速实时处理的一些专用设备。这些设备一旦定型,就不能再改,便于大批量生产。

(3) 软/硬件结合实现:目前,最为流行的数字信号处理器就是通用数字信号处理芯片,它是专为信号处理设计的芯片,既有专门执行信号处理算法的硬件,例如乘法累加器、流水线工作方式、并行处理、多总线、位翻转(倒位序)硬件等,又配置有相应的信号处理软件和专用指令,可实现工程实际中的各种信号处理。采用该信号处理器既有实时的优点,又有用软件实现的多用性优点,是一种重要的数字信号处理实现方法。

与传统的模拟信号处理方法相比,数字信号处理具有以下无法比拟的优点。

(1) 精度高:模拟网络的精度由元器件决定,模拟元器件的精度很难达到 10^{-3} 以上,而数字系统只在 14 位字长就可达到 10^{-4} 的精度。在高精度系统中,有时只能采用数字系统。

(2) 灵活性高:数字系统的性能主要由乘法器的系数决定,而系数是存放在系数存储器中的,因而只需改变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。

由于数字信号可无损地存储在磁盘、光盘等存储介质上,因而可随时传送,在远端脱机处理。另外,时间可以倒置、压缩或扩张。

(3) 可靠性强:由于数字系统只有两个信号电位“0”和“1”,因而受周围环境温度及噪声的影响较小。而模拟系统的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。

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

(5) 便于加密:随着信息安全要求越来越高,加/解密算法越来越复杂,只有数字处理才能解决这种问题。

(6) 可以实现模拟系统无法实现的复杂处理功能。模拟系统只能对信号进行一些简单的处理,如放大、滤波、经典的调制与解调等。而数字系统可以实现很多模拟系统无法实现的现代处理功能,如时分复用、严格的线性相位特性、二维甚至多维信号的处理等。

正是由于数字信号处理具有以上众多优越性,使数字信号处理技术得以在语音处理、图像处理、工业控制与自动化、通信等领域的广泛应用,也使数字信号处理学科成为发展最快、新理论与新技术层出不穷、应用领域最广泛的学科之一。

数字信号处理主要涉及以下的理论和技术:

- (1) 离散时间线性时不变系统分析。
- (2) 离散时间信号时域分析及频域分析、离散傅里叶变换(DFT)理论。
- (3) 信号采集,包括 A/D 转换、D/A 转换技术等。
- (4) 数字滤波技术。
- (5) 谱分析与快速傅里叶变换(FFT),快速卷积与相关算法。
- (6) 自适应信号处理。
- (7) 估计理论,包括功率谱估计及相关函数估计等。
- (8) 信号的压缩,包括语音信号与图像信号的压缩。
- (9) 信号建模,包括 AR、MA、ARMA、CAPON、PRONY 等各种模型。
- (10) 其他特殊法(同态处理、抽取与内插、信号重建等)。

(11) 数字信号处理的实现。

(12) 数字信号处理的应用等。

作为基础理论教材,不可能涉及数字信号处理的全部内容。本书主要讨论数字信号处理的基本理论和方法,内容涉及信号采集与重构、离散时间系统分析、离散时间信号的时域分析和变换域分析、离散傅里叶变换(DFT)理论、快速傅里叶变换(FFT)、快速卷积与相关算法、数字滤波技术等。另外,由于数字信号处理实现时,无论是用专用硬件还是用计算机软件来实现,其数字信号处理系统的有关参数以及运算过程中的结果都是以二进制数表示,并存储在有限字长的存储单元中的,这种有限精度表示与有限精度运算处理会给理想数字信号处理系统带来误差。因此,数字信号处理中的有限字长效应也是本书所要讨论的内容。

本书中引入了 MATLAB 的内容。MATLAB 是由美国 MathWorks 公司推出的一种科学计算软件,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。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。由于其强大的功能,在欧美的一些大学里, MATLAB 已经成为许多诸如数字信号处理、自动控制理论等高级教程的主要工具软件,同时也成为理工科学生必须掌握的一项基本技能。因此,本书对 MATLAB 使用与数字信号处理仿真做了介绍。

第 1 章 离散时间信号与系统

信号是信息的载体,是信息的物理表现形式,它通常是一个自变量或几个自变量的函数。如果信号仅用一个自变量表示,则称为一维信号,如语音信号;如果用两个以上的自变量表示,则称为多维信号,如图像信号。对一维信号,人们习惯用时间变量来刻画。按时间变量取值形式,信号可分为连续时间信号和离散时间信号。按信号在任意时刻的取值是否能精确确定,信号又可分为确定信号和随机信号。

在信号与系统中主要讨论连续时间信号和处理连续时间信号的连续系统,在数字信号处理中,则着重讨论离散时间信号和处理离散时间信号的离散系统。因此,本书的基础理论均以一维、确定的离散时间信号和离散系统为研究对象。

1.1 离散时间信号与序列运算

1.1.1 离散时间信号及表示方式

连续时间信号是指信号的时间变化范围是连续的,连续时间信号通常也称为模拟信号。离散时间信号是指信号的时间变化是不连续的,是离散值。若将离散时间信号的幅值量化,就能得到数字信号。

通常,离散时间信号可以通过对连续时间信号等间隔抽样来获取。例如,对连续时间信号 $x_a(t) = 2 \sin(6\pi t)$ 进行等间隔抽样,抽样间隔为 T ,得到信号在不同时刻 nT 上的取值 $x(nT)$ (n 为整数),即

$$x(nT) = x_a(t)|_{t=nT} = 2 \sin(6\pi nT), \quad n = \dots, -1, 0, 1, \dots \quad (1-1-1)$$

如图 1-1 所示。这些抽样值构成的序列 $\{x(nT), n = \dots, -1, 0, 1, \dots\}$ 即为离散时间信号,简称序列。为了描述方便,将序列 $\{x(nT)\}$ 习惯性表示为 $x(n)$ 。值得注意的是:其一,从式 (1-1-1) 可知,离散时间信号 $x(n)$ 只有在 n 为整数时才有意义,不是整数时无定义;其二,

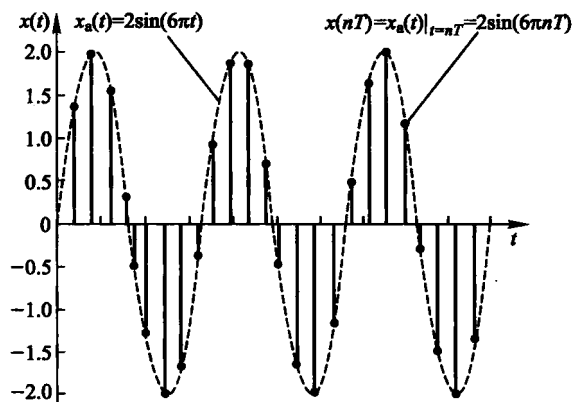


图 1-1 连续信号的抽样

抽样所得的离散时间信号不一定能反映原连续时间信号的基本特征,只有在特定的抽样条件下,连续时间信号才能由抽样的离散时间信号表征,这个特定的抽样条件将在本章 1.3 节中作详细的讨论。

离散时间信号除了用集合或公式表示外,也可以用图形来表示。例如离散时间信号 $x(n) = \{x(-4) = 0.5, x(-3) = -1, x(-2) = 2.5, x(-1) = 1.1, x(0) = 0, x(1) = 1.7, x(2) = 3.3, x(3) = -0.5, x(4) = 1.3\}$, 用图形表示,如图 1-2(a) 所示。

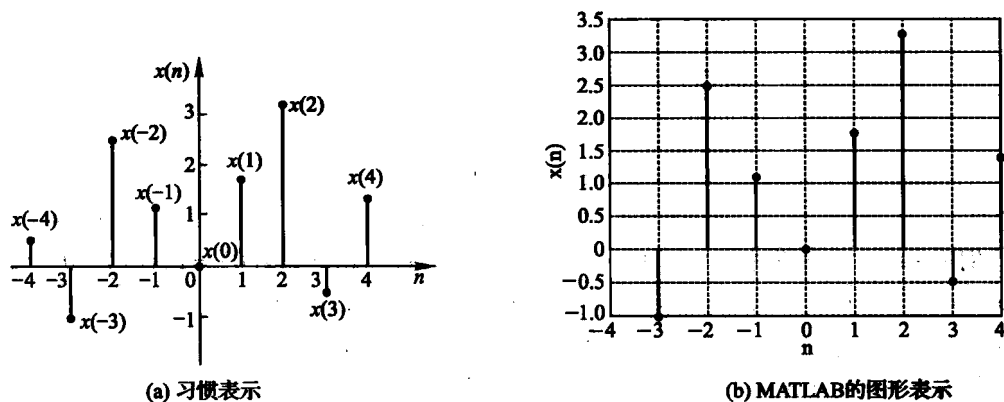


图 1-2 离散时间信号的图形表示

由于 $x(n)$ 只在 n 为整数时才有意义,不是整数时无定义,因此,在表示序列的图形中不能将各个点用线连接起来。在 MATLAB 中,用 `stem` 函数命令就可完成离散时间信号的图形表示。对该例, MATLAB 实现程序如下:

```
x = [0.5, -1, 2.5, 1.1, 0, 1.7, 3.3, -0.5, 1.3]; % 离散时间信号 x(n) 的幅度序列
n = [-4:4]; % 离散时间信号 x(n) 的时间序列
stem(n, x, ' '); % 绘棒状图
grid; line([-4, 4], [0, 0]); % 添加网格和绘 x 轴线
xlabel('n'); ylabel('x(n)'); % 标注 x 轴, y 轴
```

程序运行结果如图 1-2(b) 所示。为了仿真方便,书中大部分图形都采用 MATLAB 图形方式来表示。

1.1.2 序列的运算

序列的运算通常包括移位、和、积、时间尺度变换、翻褶、卷积和等,序列通过运算后将生成新序列,即离散时间信号通过这些运算可生成新的离散时间信号。

1. 序列移位

设某一序列为 $x(n]$, 当 $m > 0$ 时,它的移位序列 $x(n - m)$ 是由序列 $x(n)$ 延时或右移 m 位形成的新序列,称为 $x(n)$ 的延序列。而 $x(n + m)$ 是由 $x(n)$ 超前或左移 m 位形成的,称为 $x(n)$ 的超前序列。当 $m < 0$ 时,则相反。图 1-3 给出了某一序列 $x(n)$ 经移位后形成的新序列 $x(n - 2)$ 和 $x(n + 2)$ 。

2. 序列之和

两序列的和是指两序列中同序号 n (或同时刻) 的序列值逐项对应相加而构成一个新的序列,表示为