

数字信号处理教程

——MATLAB释义与实现

(第2版)

陈怀琛 编著



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

数字信号处理教程 ——MATLAB释义与实现 (第2版)

陈怀琛 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本教程系统地讲解了数字信号处理的基本理论和方法,注重物理概念的阐述,尽量把 MATLAB 的多媒体功能用于图形、动画和声音等形象的演示,是一本自始至终使用 MATLAB 来阐述问题和进行计算的数字信号处理教材。本教程中的全部例题程序和演示程序都可以免费从网上下载。本教程把《数字信号处理》课程定位为讲述“用数字方法处理(任何)信号”的技术,因此,对模拟信号的计算机处理给予了充分的篇幅,而这正是目前许多数字信号处理教材的弱点。

本书适合作为电子信息专业的大学本科学生教材,书中采用了大小两种字号混排,目的是适应不同专业 and 不同要求的本科学生。对于学过数字信号处理课程,但没有用 MATLAB 来解决有关问题的研究生和工程技术人员,也有很好的参考价值。

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

数字信号处理教程: MATLAB 释义与实现 / 陈怀琛编著. 2 版. —北京: 电子工业出版社, 2008.10
ISBN 978-7-121-07183-6

I. 数… II. 陈… III. 数字信号—信号处理—计算机辅助计算—软件包, MATLAB—教材 IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 115147 号

策划编辑: 郭 立 guoli@phei.com.cn

责任编辑: 顾慧芳

印 刷: 北京东光印刷厂

装 订: 三河市皇庄路通装订厂

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: 23.75 字数: 575 千字

印 次: 2008 年 10 月第 1 次印刷

印 数: 5000 册 定价: 39.00 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。

质量投诉请发邮件至 zlts@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2版序

本书第1版于2004年11月出版以后,得到了很好的反应。因为这本书与其他传统的教材不同,它是一本用 MATLAB 全面阐述数字信号处理教材,给出了所有概念阐述的形象演示和分析设计的计算机算法,而且提供了例题和演示的程序集,书中所有的理论和公式都可以通过执行程序得到验证,理论联系实际,学完了会快速地用计算机解决问题。心中有底。读者反映这本书的缺点主要是对本科生而言,内容有些偏多。

在修订出版第2版的时候,开始我们想把书改浅一些,薄一点,为此又专门征求了一些曾仔细阅读使用过本书的教授的意见。现把他们的意见摘出几条:“我觉得您已出版的‘释义’虽然厚一些,但写得易懂。若从头写一本更薄的,恐怕篇幅小,难以达到‘释义’那本书的效果。”“您的书是国内用 MATLAB 阐述 DSP 的第一本好书。最好不重新另写一本。完全可以在原来基础上进一步完善。”……经过探讨,大家觉得本书在对物理和数学概念的阐述上毫不逊于传统的教材,例如“关于模拟频率和数字频率的定义”,“关于角频率的正负”,“对 DFT 的序号 k 与实际频率 f 的关系”等等,讲得很细致,很便于本科生接受。其实,作者收到过一些本科生赞扬的来信,他们的经验是,不要怕书厚,不要怕 MATLAB,一个一个问题的看下去,这本书讲得很清楚,而且马上可以用程序验证,很好懂。

目前,大学本科用这本书作教材的还不太多,第一个原因是很多大学生(甚至部分老师)MATLAB 基础差;见到程序就头痛了,不敢用 MATLAB 教学;但是从国内外发展趋势来看,要搞信号处理,不用计算机是不行的,用 MATLAB 的学校只会愈来愈多。令我们高兴的是:随着时间推移,本书的大量程序已为多本其他教材所引用。我们不能自己放弃或减弱这个特色。第二个原因是书中确有少数偏深的内容,这些内容虽然超越了本科大纲,但有利于已经毕业的读者在设计中更好地运用 MATLAB,也有利于大学生在后续课程或毕业设计中应用。考虑到第1版的读者群并不限于本科生,很多是毕业了工程师或研究生,这些内容仍是重要的,不能删除。为了兼顾大学生阅读方便,在本版中把它们用小号字印刷。

这样,第2版的修订量就比较小,主要包括了以下三方面:(1)改正了第1版中的一些印刷错误和图文标注;(2)由于 MATLAB 软件的升级,对相关的部分按新版本作了修订;(3)尽量减少大号字的篇幅,把它们改为小号字,使本科生能抓住要点,阅读方便。修订后程序集内容基本不变,新程序集名称改为 dsk04n,修改中尽量考虑了新旧版本的兼容问题。

程序下载地址为:

<http://www.broadview.com.cn/manage/OtherDownFiles/MATLABDownload/default.htm>,

作者的博客地址为: <http://www.blogcn.com/user79/chenhuaichen/index.html>,

作者的电子邮址为: hchchen1934@163.com 或 hchchen@xidian.edu.cn

北京理工大学的王大伦教授曾仔细地阅读过本书第1版,对书中的大小错误都作了批注,并反馈给作者,对第2版的修订帮助很大,在此特表谢意。

用 MATLAB 已经可以把信号处理的概念设计变成了非常方便的工作。近若干年来,Mathworks 公司致力于扩展 MATLAB 的功能,目的是用基于模型的流程,使用统一的软件工具,把概念设计变成工程设计。这就更提高了把 MATLAB 作为设计工具的重要性。我们在本版中加了第10章,对此作了一个引导性的介绍。北京迈斯沃克公司(Mathworks China)的徐正高高级工程师写了该章中的10.4和10.5两节,我们在此深表感谢。

陈怀琛 2008-05-19

于西安电子科技大学

第 1 版序

随着电子技术迅速地向数字化发展,《数字信号处理》越来越成为广大理工科,特别是 IT 领域的学生和技术人员的必修内容,先前也出版过很多有关这方面的书籍。但国内这门课程本身的现代化进程,却并不令人满意。这里的“现代化”指的是利用最新的计算技术和网络手段进行教学。我编写这本书的目的,就是想突出利用 MATLAB 和 Internet 来进行数字信号处理的教学。

信号处理涉及大量的运算,可以说离开了计算机及相应的软件,就不可能解决任何稍微复杂的实际应用问题。早在 20 世纪 90 年代中期, MATLAB 就已成为国际公认的信号处理的标准软件和开发平台。从 1996 年后,美国新出版的信号处理教材就没有一本是不用 MATLAB 的(见参考文献 [1,3,7,8,9])。而国内把 MATLAB 贯彻始终的信号处理教材却还很少,在教学中真正用 MATLAB 的就更少,两者相比落后了近八年。本书的一个意图就是使之成为一本自始至终使用 MATLAB 阐述问题和进行计算的数字信号处理教材,更好地与国际接轨。

关于《数字信号处理》课程的内涵,存在着两种不同看法:一种看法把“数字信号”限定为“处理”的对象;另一种看法则把“数字技术”作为一种方法,研究如何用它来“处理信号”。从第一种看法出发,“数字信号处理”课程只讲离散信号。经验证明,这种划分会造成学生不会用数字技术处理连续信号,形成学科内容的“空白区”。而从第二种看法出发,“数字信号处理”课程应该同时考虑连续和离散信号,重点是如何用计算机进行分析和计算。我赞同后一种看法。因此,在本书多处加强了离散信号和连续信号等价性的讨论,并详细介绍了连续信号频谱的数值计算问题。

中国教材一般将快速傅里叶变换列为一章,篇幅约 30~40 页。美国教材则通常列为一节,篇幅一般只有 10 页左右。这是什么原因?我认为在目前所有的科学计算软件和数字信号处理芯片中,FFT 已经是标准的模块,一般都没有必要自己编写 FFT 程序,所以重点应该是 FFT 的用法而不是算法。国外教材对这部分内容经历了“薄—厚—薄”的历史过程,我国则慢了一拍。所以本教材也精简了这方面的内容。

在把数字信号处理概念与 MATLAB 语言相结合的方面,国外教材有多种模式。有的以讲概念为主, MATLAB 放在作业和实验中(见参考文献 [9]);有的以 MATLAB 为主,概念则建议读者另选教材(见参考文献 [1]);有的两者都讲得不少,但书就变得很厚(见参考文献 [8]);本书则大体采纳了参考文献 [3] 的模式,以系统地讲解信号处理的原理为主,用 MATLAB 程序的核心语句帮助解释概念。要做到这点,学生必须在修本课程以前已经学过并用过 MATLAB。当然,这并不是说,没有学过 MATLAB 就不能用这本书。我曾在西安电子科技大学和桂林电子工业学院两次使用 MATLAB 进行数字信号双语教学,教材是英文书(见参考文献 [1]),课堂 90% 用英语讲,同学中多数没有学过 MATLAB。课还是正常进行,完成得还可以。但这些学生都已通过英语四级,因此属于班级中程度较高者,而且多加一个学分。尽管如此,在教学中有些同学仍提出“究竟着重概念还是编程”这样的问题,说明他们

对于将语言和概念结合起来仍感到困难。所以,经验告诉我们:从大面积课堂教育而言,最好不要把 MATLAB 放到高年级和信号处理混在一起学。

我一贯的指导思想是:学生应在大学一年级或二年级学习 MATLAB,这对各门课程都有好处。信号处理课是大学三年级开设的。此时学生应该已经能用矩阵建模并用 MATLAB 语言来思考和概括数学问题了。有了这样的基础,才能对本书有较深的体会。建议未学过 MATLAB 的读者,至少用 10 小时左右先学习其入门并实际做一些应用。为此,我们新制作了一套“MATLAB 入门”(两张)讲课光盘。该组光盘以 MATLAB6.x 为背景(也介绍一点 MATLAB 7.0),可在计算机上实时播送。本课程的老师统一购买了这套光盘给大家播放,可以不用费劲去备 MATLAB 课。与之配套的教材是参考文献[6]或参考文献[16]。其中,参考文献[16]是为大学一、二年级同学设计的,在应用方面结合的是数学、物理、力学、电学等;参考文献[6]是为大学二、三年级同学设计的,结合了电路、信号和系统、信号处理和控制原理四门课程。这套光盘由本人主讲,西安电子科技大学网络学院制作。有关发行购买事项,请各位教师注意下载程序中另附的通知。

本书利用电子工业出版社的博文视点公司网站向读者免费提供完整的子程序集、例题程序集和示教程序集(即附录 B,C,D 中的全部程序)共 180 余个,程序集名为 dsk04,可免费下载。下载网址为: <http://www.broadview.com.cn/>, 单击[资源下载](#),再按书名查找即可。下载前要按提问填写下载人的必要信息,在此网页上,还将提供作者其他有关书籍程序集和光盘获取的信息。由于读者可以免费获得全部的程序,从而也可得到程序产生的图形。我们把书中的程序都用小字排版,图形也缩排了,以降低篇幅和书价。希望读者理解。

为了使教师能够较方便地利用本书进行教学,我们准备了一套教师用光盘。其中包括两部分内容:一是为讲授本书用的 PowerPoint 幻灯片,约 900 张;二是本书部分习题的题解,因为有些教师认为若有题解流入学生中,出题的效果将打折扣。为了兼顾对题解的不同看法,我们只给了三分之一的题解。预计这张教师光盘将于本书出版后三个月内完成。由“西安电子科技大学电工电子教学基地”进行版权管理。我们将在下载程序中附上有关教师用光盘的发行办法和申购表,请读者注意。

为了适用不同类型的专业和学生对数字信号处理的不同要求,本书在排版上分了大小两种字型。大字是达到基本要求应掌握的内容,小字排版的部分是可以跳过不看的,不会影响对本课程基本概念的掌握。整个第 9 章都属于任选内容,但没有用小字,因为这个会引起误解,同时使读者看书时可以舒服一些。每章的最后都给出了复习思考题和习题,以利于读者自学复习。

为了阐述数字信号处理中的重要概念,本书采用了一些其他教材中未采用的术语和方法。例如,离散时间傅里叶变换、采样序列的等价序列、符幅特性、在无穷远邻域的收敛性、离散最小二乘设计法等。书中也有一些作者本人的研究工作内容。比如,信号流图的解析形式及 MATLAB 解、信号流图与状态空间法的转换和 MATLAB 解、系数向量量化的子程序以及一些有图形、动画和声音表现的演示程序等。其目的是引起大家讨论,更好地解放思想,用创新的态度来对待这门课程的教学。

这本书采用了参考文献[4,3,1,5,8]中不少的内容和例题,用到了这些作者的宝贵经验,也借用了一些图形、例题和习题,乘机机会向这些教材的作者们表示谢意。在2003年8月的“第十一届信号处理学术年会”上,我曾把编写本书的指导思想,与许多信号处理界的专家(如袁保宗、程佩青、张贤达等教授)交换过意见,得到了他们的支持。本书初稿形成后,又曾广泛征求了本校的丁玉美、赵树杰、廖桂生、高西全、史林等长期从事数字信号处理教学的教授们对初稿的意见,特别是丁玉美教授仔细阅读了稿件,给作者很大的帮助。西安电子科技大学的段宝岩校长还特别资助了作者的学术交流经费,保铮院士对本书的出版也给予了关心。此外 Mathworks 公司对本书的出版也给予了软件新版本的支持,电子工业出版社的博文视点公司的各位编辑对本书一路绿灯,提供了出版和网页方面的一切方便,使本书能及早问世。对大家的这些帮助,作者表示衷心的感谢。

由于作者水平和编著时间的限制,书中肯定有很多不足之处,欢迎广大读者指正。我的电子邮址为 hchchen1934@163.com,电话为(029) 88202988。我很希望得到读者对本书的反馈信息。欢迎读者将教学实践中积累的经验告诉本人,并希望大家不断改进和充实网上的演示程序!

陈怀琛 2004 年 8 月 31 日

于西安电子科技大学

目 录

第 1 章 信号和信号处理	1
1.1 信号的分类	1
1.2 信号处理	5
1.2.1 信号处理的举例	5
1.2.2 信号处理的一般任务	6
1.2.3 数字信号处理	7
1.3 信号采样和复原实例	8
1.4 本书概貌的说明	10
复习思考题	12
习题	12
第 2 章 时域中的离散信号和系统	13
2.1 模拟信号与其采样序列的关系	13
2.2 基本序列及序列的基本运算	14
2.2.1 序列的表示方法	14
2.2.2 常用的典型序列	15
2.2.3 序列的运算和变换	17
2.3 序列的奇偶分解、卷积和相关	21
2.3.1 周期序列	21
2.3.2 实对称序列	21
2.3.3 复数域的偶序列和奇序列	22
2.3.4 序列的卷积	23
2.3.5 序列的相关	25
2.4 时域离散系统	26
2.4.1 线性系统	27
2.4.2 线性时不变离散系统	27
2.4.3 LTI 离散系统的数学描述——线性常系数差分方程	28
2.4.4 用 MATLAB 的递推解法	29
2.4.5 用时移算子 z^{-1} 表示的离散系统	29
2.5 脉冲响应——用时间序列表征的系统特性	30
2.5.1 脉冲响应的特性	30
2.5.2 用解析卷积方法求系统输出	31
2.5.3 用向量-矩阵乘法进行卷积计算	32
2.5.4 用脉冲响应判断系统的因果性	34
2.5.5 用脉冲响应判断系统的稳定性	34
2.5.6 用脉冲响应分类数字滤波器	35

2.6 序列运算的 MATLAB 函数列表	36
复习思考题	37
习题	38
第 3 章 离散序列的两种傅里叶变换	40
3.1 序列信号的周期性和频率	40
3.1.1 序列信号的周期性	40
3.1.2 序列信号的频率	41
3.1.3 连续信号的频谱	43
3.1.4 有限带宽序列	44
3.2 离散时间傅里叶变换 (DTFT)	45
3.2.1 离散时间傅里叶变换 (DTFT) 的定义	45
3.2.2 DTFT 的性质	46
3.2.3 实数奇偶序列的 DTFT	48
3.2.4 复数奇偶序列的 DTFT	48
3.2.5 DTFT 的解析计算示例	49
3.2.6 DTFT 的数值计算示例	51
3.2.7 用 MATLAB 计算 DTFT	52
3.2.8 MATLAB 计算举例	54
3.3 离散系统的频率特性	57
3.3.1 定义	57
3.3.2 用 MATLAB 计算系统频率特性	59
3.4 周期序列的频谱——离散傅里叶级数	60
3.4.1 从一个计算实例出发	60
3.4.2 周期序列的傅里叶级数	62
3.4.3 用 MATLAB 计算离散傅里叶级数	63
3.5 离散傅里叶变换 (DFT)	64
3.5.1 离散傅里叶变换 (DFT) 的定义	64
3.5.2 用 MATLAB 计算 DFT 和 IDFT	66
3.5.3 两种离散傅里叶变换 (DFT 与 DTFT) 的关系	66
3.6 离散傅里叶变换 (DFT) 的特性	68
3.6.1 隐含周期性	68
3.6.2 线性性质	69
3.6.3 循环移位性质	69
3.6.4 循环折叠性质	71
3.6.5 DFT 的循环对称性	72
3.6.6 循环卷积特性	75
3.6.7 帕瑟瓦尔定理	77
3.7 用 DFT 计算线性卷积	78
3.7.1 循环卷积与线性卷积	78

3.7.2	分段卷积	81
3.7.3	分段卷积的 MATLAB 函数	82
	复习思考题	84
	习题	84
第 4 章	信号频谱的高效计算	88
4.1	各种傅里叶变换及其相互关系	88
4.1.1	傅里叶变换的主要类型	88
4.1.2	DFT 与其他变换的直接关系	90
4.2	快速傅里叶变换 (FFT)	91
4.2.1	时域抽取 (DIT) 基二 FFT 算法	91
4.2.2	用 MATLAB 程序描述 FFT 算法	95
4.2.3	基四和其他基的 FFT 算法	96
4.2.4	其他 FFT 算法	98
4.3	用 FFT 计算离散时间序列的频谱	99
4.3.1	有限长离散时间序列的频谱计算	99
4.3.2	用补零方法由 FFT 求 DTFT	100
4.3.3	无限长序列的频谱计算	101
4.4	连续信号采样中的频谱变换	103
4.4.1	时域采样定理 (奈奎斯特定理)	103
4.4.2	由离散序列重构模拟信号	106
4.4.3	理想预滤波作用的定量分析	109
4.5	连续信号的频谱计算	110
4.5.1	非周期连续信号的频谱计算	110
4.5.2	连续周期信号的频谱计算	116
4.5.3	循环计算中对应频点的确定方法	117
4.6	从频谱计算序列信号 (IDFT)	119
4.6.1	频率域采样定理	119
4.6.2	从频谱计算离散时间序列	120
4.6.3	从频谱计算连续时间信号	123
4.7	用 FFT 计算能量	125
4.8	小结	126
	复习思考题	127
	习题	128
第 5 章	变换域中的离散时间系统	130
5.1	z 变换	130
5.1.1	z 变换的定义与收敛性	130
5.1.2	z 变换的重要特性和定理	133
5.1.3	z 变换的计算实例	135

118	5.2 z 反变换和差分方程的解	136
118	5.2.1 用留数定理求 z 反变换	136
118	5.2.2 用部分分式法求 z 反变换	137
118	5.2.3 幂级数法(长除法)求 z 反变换	140
118	5.2.4 用 z 变换解差分方程	142
118	5.3 z 域中对系统的描述	146
118	5.3.1 系统函数(传递函数)	146
118	5.3.2 正幂系统函数和零极增益形式	149
118	5.3.3 零极点分布与系统的因果性和稳定性	151
118	5.4 z 平面上的谱分析	153
118	5.4.1 零极点与频率特性的关系	153
118	5.4.2 非单位圆周上的频谱分析	154
118	5.4.3 z 平面螺旋线上的谱分析(Chirp- z 变换)	155
118	5.5 理想滤波器	158
118	5.5.1 理想的因果低通滤波器的频率特性	158
118	5.5.2 线性相位条件对脉冲响应对称性的要求	160
118	5.5.3 考虑因果性和对称性对理想滤波器的影响	161
118	5.6 低阶数字滤波器	162
118	5.6.1 一阶数字滤波器	162
118	5.6.2 二阶数字滤波器	164
118	5.6.3 梳状滤波器的零极点分布	165
118	5.7 全通滤波器	166
118	复习思考题	167
118	习题	168
118	第6章 数字滤波器结构	171
118	6.1 概述	171
118	6.2 滤波器的信号流图结构及解法	172
118	6.2.1 信号流图	172
118	6.2.2 信号流图方程的计算机解法	173
118	6.2.3 信号流图与数字系统的网络结构图	175
118	6.3 FIR 基本网络结构	175
118	6.3.1 概述	175
118	6.3.2 直接形式	176
118	6.3.3 级联形式	176
118	6.3.4 线性相位形式	177
118	6.3.5 频率样本结构	178
118	6.4 IIR 基本网络结构	181
118	6.4.1 直接形式	182
118	6.4.2 级联形式	182

6.4.3	并联形式	184
6.5	一些其他类型的滤波器结构	189
6.5.1	全零点格型 (Lattice) 滤波器	189
6.5.2	全极点格型滤波器	191
6.5.3	用信号流图与 MATLAB 结合求解格型滤波器	193
6.6	状态变量分析法	195
6.6.1	状态方程和输出方程	195
6.6.2	状态方程和其他结构参数的转换	196
6.6.3	信号流图方程与状态方程的关系	197
6.6.4	例题: 正余弦序列产生器	197
6.7	各种结构形式的比较	200
6.7.1	从计算的复杂性做比较	200
6.7.2	从减小系数量化影响做比较	200
	复习思考题	200
	习题	201
第 7 章	FIR 滤波器设计	204
7.1	数字滤波器设计的基本要求	204
7.1.1	数字滤波器的设计基本步骤	204
7.1.2	数字滤波器的主要指标	204
7.1.3	为什么以低通滤波器为典型	207
7.2	线性相位滤波器的特性	207
7.2.1	线性相位和幅特性 (Amplitude Response)	207
7.2.2	幅特性的计算举例	211
7.2.3	计算幅特性的 MATLAB 程序	212
7.2.4	线性相位滤波器的零极点分布	214
7.3	设计 FIR 滤波器的窗函数法	215
7.3.1	对脉冲响应进行截断的分析方法	215
7.3.2	矩形窗截断的定量分析	216
7.3.3	几种其他窗函数的介绍	219
7.3.4	MATLAB 提供的窗函数	220
7.3.5	用窗函数设计 FIR 滤波器的步骤	222
7.4	利用频率样本法设计 FIR 滤波器	228
7.4.1	预期频率特性的设置方法	228
7.4.2	频率样本法的设计过程	229
7.4.3	MATLAB 中频率样本法的设计函数	232
7.5	FIR 滤波器的最优设计法	233
7.5.1	设计 FIR 滤波器的离散最小二乘法	234
7.5.2	最小最大波动法设计滤波器	238
7.5.3	MATLAB 中最优等波动滤波器的设计函数	241

7.6	FIR 滤波器设计的一些深入问题	244
7.6.1	关于四种线性相位滤波器类型的应用范围	244
7.6.2	数字微分器的设计	244
7.6.3	Hilbert 变换器的设计	247
	复习思考题	249
	习题	250
第 8 章	IIR 滤波器设计	253
8.1	关于模拟滤波器的预备知识	253
8.1.1	模拟滤波器的指标	253
8.1.2	以模拟滤波器为基础的设计方法	255
8.2	模拟滤波器原型的设计	256
8.2.1	巴特沃斯低通滤波器	256
8.2.2	切比雪夫 I 型低通滤波器	261
8.2.3	切比雪夫 II 型低通滤波器	266
8.2.4	椭圆低通滤波器	268
8.2.5	滤波器原型的相位响应	270
8.3	由模拟滤波器变换为数字滤波器	270
8.3.1	脉冲响应不变法	270
8.3.2	双线性变换法	276
8.4	模拟滤波器的频带变换	284
8.4.1	低通到低通的频带变换	285
8.4.2	低通到高通的频带变换	285
8.4.3	低通到带通的频带变换	286
8.4.4	低通到带阻的频带变换	287
8.4.5	信号处理工具箱中的频带变换函数	288
8.5	数字滤波器的频带变换	291
8.6	MATLAB 中直接设计 IIR 数字滤波器的函数	296
8.7	IIR 和 FIR 数字滤波器的比较	297
8.8	MATLAB 中的滤波器设计工具 (fdatool)	298
	复习思考题	300
	习题	301
第 9 章	综合应用	303
9.1	信号处理工具 (sptool) 的介绍	303
9.2	语音数字化量化噪声的改善	306
9.3	系数量化和运算量化的影响	310
9.3.1	数的浮点和定点表示方法	310
9.3.2	系数量化对 FIR 滤波器的影响举例	311
9.3.3	系数量化对 IIR 滤波器的影响举例	312

9.3.4	运算量化和溢出问题	313
9.3.5	滤波器设计工具中的量化处理	314
9.3.6	定点 (Fix-point) 工具箱	315
9.4	数字信号处理在双音拨号系统中的应用	316
9.4.1	双音多频拨号	316
9.4.2	Goertzel 算法	316
9.4.3	检测 DTMF 信号的 DFT 参数选择	318
9.4.4	生成和检测 DTMF 信号的演示程序	319
9.5	正余弦信号的频谱分析	320
9.6	音乐信号处理	326
9.6.1	时域处理方法	326
9.6.2	频域处理方法	327
9.7	变采样率数字滤波	329
9.7.1	信号的整数倍内插	329
9.7.2	信号的整数倍抽取	331
9.7.3	分数倍变采样率和相应的 MATLAB 函数	332
9.7.4	整数倍抽取和内插的应用举例	333
9.8	稀疏天线阵列设计	333
	复习思考题	335
	习题	336
第 10 章	信号处理从概念设计到芯片实现	338
10.1	嵌入式系统及其开发流程	338
10.2	系统仿真 (Simulink) 工具简介	339
10.2.1	概述	339
10.2.2	模块库及模型的建立	340
10.2.3	仿真的运行	341
10.3	MATLAB 与嵌入式代码的衔接	342
10.4	基于模型的开发流程	343
10.5	嵌入式代码开发的一个实例	345
10.6	数字信号处理的未来	349
附录 A	信号处理工具箱函数集	351
附录 B	本书自编子程序索引表	357
附录 C	例题程序索引表	358
附录 D	图形生成和演示程序索引表	362
	参考文献	363

第 1 章 信号和信号处理

1.1 信号的分类

任何携带信息的物理量都可称为信号。自然界中充满了信号，其中有的是客观存在的，包括自然的和社会的信号；有的则是人类有目的地制造的信号；有的信号是有用的；有的则是不需要的，甚至是有害的，从这些信号中提取愈来愈多的对人类有用的信息，抑制其中有害的信息，是现代信息技术的一个不断追求且永无止境的目标，它推动了信号处理科学在近几十年来的飞速发展。把计算机和数字技术应用到信号处理中，是技术手段上的一个飞跃，它开拓了一个用数字技术来快速、精确地处理信号的广阔天地。因而，数字信号处理就成为人们研究和学习的一个热点。

有各种各样的方法对信号进行分类。

(1) 按信号载体的物理特征，可分为：电、磁、光、机械、热、声音等，一些社会科学研究的信号则以统计数据为载体。

(2) 按信号中的自变量的数目可分为：

- 一维信号，如语言和音乐，它们是以时间为自变量的。
- 二维信号，如黑白照片或地形图，它们以 x, y 两维坐标为自变量；彩色照片的自变量仍然是二维，但其因变量较多，有红、绿、蓝三色，即三个因变量。
- 三维信号，如黑白电视图像，它的三个自变量是 x, y 坐标和时间 t ；彩色电视图像信号则既有三个自变量，又有三个因变量（如红、绿、蓝三色）。
- 四维信号，比如大气中的温度分布，其自变量为经度、纬度、高度和时间。

本书只讨论一维信号的处理问题，它也是研究多维信号处理的基础。

(3) 按照信号中自变量和因变量的取值特点可分为：

- 连续时间 (Continuous-Time, CT) 信号或连续信号，其自变量可连续取值，通常，其因变量也可以在一定动态范围内任意连续取值，即模拟量。所以这样的信号也称为模拟信号，写成 $x_a(t)$ 。严格地说，自变量的连续性称为连续时间，因变量的连续性，称为模拟信号。物理世界的大多数信号属于这个范围。
- 离散时间 (Discrete-Time, DT) 信号，虽然时间仍是连续变化的，但变量仅在离散的時刻上定义。大多数离散时间信号是由对连续时间信号采样而得到的，例如，每小时量一次温度，每秒测定十次目标坐标等。但有一些离散时间信号是固有的，比如每天计算一次利息等。因变量 x 的值仍然为可以连续取值的模拟量（在本书中，因主要讨论离散信号，所以对离散信号不加下标，而对连续模拟信号加下标 a ）。通常采样周期是一个固定值 T ，离散时间是一个顺序增加的整数数组，可写成 nT ，其中 $n=0, 1, \dots$ 。因此长度为 N 的离散信号 $x(n)$ 可表示为：

$$x(n) = x_a(t) \Big|_{t=nT} \quad n=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (1.1.1)$$

- 数字信号 (digital signal): 为了在数字系统中对这些因变量数据进行存储和处理, 就必须把它们用适当字长的二进制数来表示, 这个运算称为量化 (quantize)。得到二进制数的最低位所代表的值, 就是分辨率, 又称为量化步长。如果离散信号中的因变量不是模拟量而是量化了的数字量, 或原来的模拟量经过了取样和模拟/数字变换, 输出为离散值, 则这种自变量和因变量都只取离散值的信号称为数字信号。把数据 x 变成量化值 x_q 的数学变换关系如下。

$$x_q = \Delta x \cdot \text{round}(x / \Delta x) \quad (1.1.2)$$

假如量化步长为 Δx , 则 $x / \Delta x$ 是把数据 x 量化为步长的倍数, 一般情况下, 它是带小数的。Round ($x / \Delta x$) 是用四舍五入的方法取此倍数为整倍数。再把取整后的倍数乘以 Δx , 就成为量化后的值 x_q 。

这个量化算法, 不仅用于单个数据, 也适用于数组。把数取整的方法还有向上取整 $\lceil x \rceil$ 、向下取整 $\lfloor x \rfloor$ 、向零取整等, 相应的 MATLAB 函数是 ceil, floor, fix 等。round 是最常用的。

用 MATLAB 来实现时, 由于它只接受英文字符, 设 $\text{deltax} = \Delta x$, 量化语句就写成:

```
xq=round(x/deltax)*deltax;
```

例如, 若 $x=[3.141 \ 59, 0.384 \ 55, 54.375 \ 3, -0.134 \ 273]$; $\text{deltax}=2^{-4}$;

则执行量化语句 $x_q=\text{round}(x/\text{deltax})*\text{deltax}$; 的结果为:

```
xq =      3.125 0      0.375 0      54.375 0      -0.125 0
```

这是一种按绝对值或定点数进行量化的方法。对所有的数, 量化步长都是 $2^{-4}=0.0625$ 。所以其量化造成的绝对误差最大为 $\text{deltax}/2$ 。如果考虑相对误差, 即数的误差与其绝对值之比, 可表示为: $\text{error}=(x_q-x)/\text{abs}(x)$, 得到如下结果:

```
error = -0.005 3   -0.024 8   -0.000 0   -0.069 1
```

结果是: 对大的数, 量化造成的相对误差小; 而对小的数, 量化造成的相对误差大。对于一个信号序列, 由于只能用同一个 A/D 转换器进行量化, 量化步长必须是相同的, 所以只能采取这种方式。人们希望的往往是使相对误差大体相等的量化方法, 也称为浮点数的量化方法。这可以用软件实现, 用硬件是不容易做到的。第 9.2 节中还将介绍用非线性变换的方法来实现对信号的近似同等的相对量化。

下面举个例子说明这三种信号, 以加深理解。

例 1.1.1 设连续信号为 $x_a(t) = \sqrt{t} + \cos t$, $0 \leq t \leq t_f = 6$ 。

其中 t_f 为终点时刻。若采样周期为 0.5s, 求采样后的离散时间信号; 又设 A/D 变换的量化步长为 0.5, 求量化后的数字信号, 并绘出曲线。对连续时间信号、离散时间信号和数字信号进行比较。

解: 用 MATLAB 语言来描述此问题的模型。首先建立连续时间的自变量向量 t , 程序中, 自变量 t 是可在 $0 \sim t_f$ 秒中取任何值的连续量, 因变量 x_a 也可以取任何值的模拟量, 但计算机无法严格地表示连续量和模拟量。就自变量来说, 它只能把 t 取得很密。程序中将其表示为 $t=0:\text{dt}:t_f$; 把时间增量 dt 取得很小, 例如取 $\text{dt}=0.001$ 。够不够密不能只看 dt 绝对值的大小, 而要看相邻两个样本值之间变化是不是足够小, 真正严格的数学标准只有通过傅里叶分析才能建立。因变量就取 MATLAB 中的双精度格式, 其动态范围是 10^{-308} 到 10^{308} , 而有效值是十进制数 15~16 位, 分辨率是 2.24×10^{-16} , 看来很接近于模拟量了。即使如此, 严格地

从理论上说, 程序中的 t 和 x_a 相对于真正的连续量和模拟量还差很远, 而且这个距离是计算机永远无法超越的。工程上只能不断逼近理论值, 这是学习本课中应具备的工程观点。

将此时间轴按 $T=0.5\text{ s}$ 的采样周期进行分割, 得到的离散时间的自变量向量 n 。通常它从零开始, 取顺序增加的整数, 直到终点 t_f/T , 表示为 $n=[0:1:6/T]$ 。将按这个采样周期对此信号 x_a 进行采样, 所得的离散时间信号的表达式为

$$x(n) = x_a(t)|_{t=nT} = \sqrt{nT} + \cos(nT), \quad n=0, 1, \dots, 12$$

它们在时间轴上只能在间隔为 $T=0.5\text{ s}$ 的间断点上取值, 而作为因变量的 x 在纵坐标方面的取值是连续的, 即仍然是模拟信号。它取的是 MATLAB 中的双精度数据格式, 因而和 x_a 取值非常接近, 画在图上, 它们应该是重合的。

将 x 量化为 x_q 的方法已在上面详细说明过了, 此处只要设定 $\text{deltax}=0.5$ 即可。

根据以上分析, 建议读者用笔算的方法求出 $n=0\sim 12$ 共 13 点处的离散因变量 x 和它们的量化值 x_q , 并且可以用草图画出曲线。然后与下面的 MATLAB 程序 hc111 比较, 研究用 MATLAB 编程如何实现采样和量化。

```
dt=0.001; tf=6; t=0:dt:tf;
xa=sqrt(t)+cos(t);
T=0.5; n=0:tf/T;
x=sqrt(n*T)+cos(n*T);
deltax=0.5;
xq=round(x/deltax)*deltax;
```

```
% 建立连续自变量向量
% 原始的时间连续信号 xa(t)
% T 为采样周期, 建立离散自变量向量
% 采样周期为 T 的离散时间信号 x(n)
% deltax 为 x 的量化步长
% 舍入量化后的数字信号 xq
```

上面六行程序算出了信号的模拟值 x_a , 离散采样值 x 和量化值 x_q 。后面若加上绘图语句, 就可以得到图 1.1.1。为节省篇幅, 此处把绘图和标注语句予以省略, 读者可从网上提供的程序集中看到完整的程序。

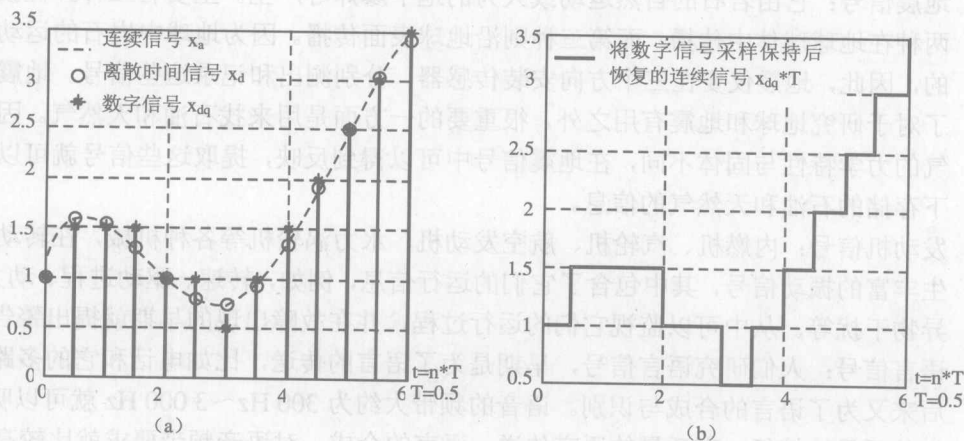


图 1.1.1 连续信号、离散时间信号和数字信号

图 1.1.1(a) 图给出了这三种不同信号的曲线, 连续时间模拟信号的曲线用虚线画出, 离散时间信号用空心圆点画出, 而数字信号用星号画出, 图上还画出了纵横坐标量化后的网格。为了看清楚时间离散化和因变量量化对原始波形的影响, 现把数字信号在一个采样周期内展

注: 本书中的插图是由程序运行直接产生的, MATLAB 认为正、斜体是一样的, 其图内外文字一律为正体, 不遵循“物理量名称的外文代号为斜体”的规则。