

国外电子与通信教材系列

上册

Mc  
Graw  
Hill

# 数字信号处理

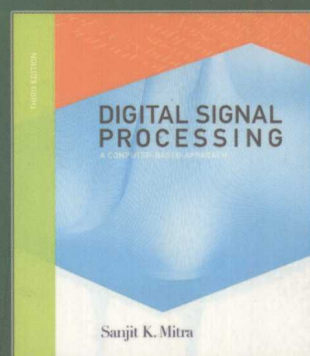
——基于计算机的方法（第三版）

## Digital Signal Processing

A Computer-Based Approach, Third Edition

[美] Sanjit K. Mitra 著

孙洪 等译



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry  
<http://www.phei.com.cn>

国外电子与通信教材系列

# 数字信号处理

—— 基于计算机的方法 (第三版)

(上册)

Digital Signal Processing

A Computer-Based Approach

Third Edition

[美] Sanjit K. Mitra 著

孙洪 等译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书是数字信号处理领域的经典教材,内容涵盖了信号与信号处理、时域中的离散时间信号和系统、变换域中的离散时间信号和系统、连续时间信号的数字处理、有限长离散变换、 $z$ 变换、数字滤波器的结构与设计与DSP算法实现、有限字长效应的分析、多速率数字信号处理、多速率滤波器组和小波、数字信号处理应用等方面。本书的特点在于讲解上述内容的同时,给出了MATLAB程序验证,并有大量的高质量习题和仿真作业。

本书的上册可作为高等院校电子信息类专业本科生的教材,下册可作为研究生的教材,也可供有关技术、科研管理人员使用,或作为继续教育的参考书。

Sanjit K. Mitra: Digital Signal Processing: A computer-Based Approach, Third Edition.

ISBN: 0-07-286546-6

Copyright © 2005 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

Original language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed in any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified chinese translation edition jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) Co. and Publishing House of Electronics Industry. Copyright © 2006.

本书中文简体字翻译版由电子工业出版社和美国麦格劳-希尔教育出版(亚洲)公司合作出版。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司激光防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2005-3115

### 图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理.上册:基于计算机的方法:第3版/(美)米特拉(Mitra, S. K.)著;孙洪等译.

北京:电子工业出版社,2006.6

(国外电子与通信教材系列)

书名原文: Digital Signal Processing: A computer-Based Approach, Third Edition.

ISBN 7-121-02652-X

I. 数... II. ①米... ②孙... III. 数字信号-信号处理-教材 IV. TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第055833号

责任编辑:谭海平

印 刷:北京市顺义兴华印刷厂

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

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:34.75 字数:971千字

印 次:2006年6月第1次印刷

定 价:49.80元

凡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。联系电话:(010)68279077。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。

## 序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。


我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授

“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

## 出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学工作中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择 and 自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为作好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、南京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过与作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

## 教材出版委员会

主任	吴佑寿	中国工程院院士、清华大学教授
副主任	林金桐	北京邮电大学校长、教授、博士生导师
	杨千里	总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长 中国通信学会常务理事、博士生导师
委员	林孝康	清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	徐安士	北京大学教授、博士生导师、电子学系主任
	樊昌信	西安电子科技大学教授、博士生导师 中国通信学会理事、IEEE 会士
	程时昕	东南大学教授、博士生导师
	郁道银	天津大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	阮秋琦	北京交通大学教授、博士生导师 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长 国务院学位委员会学科评议组成员
	张晓林	北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会副主任委员 中国电子学会常务理事
	郑宝玉	南京邮电大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	朱世华	西安交通大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员
	彭启琮	电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员
	毛军发	上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	赵尔沅	北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报（英文版）》编委会主任
	钟允若	原邮电科学研究院副院长、总工程师
	刘彩	中国通信学会副理事长兼秘书长，教授级高工 信息产业部通信科技委副主任
	杜振民	电子工业出版社原副社长
	王志功	东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长 教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员
张中兆	哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院院长	
范平志	西南交通大学教授、博士生导师、计算机与通信工程学院院长	

## 译者序

数字信号处理已经成为几乎所有大学为电子及其相关专业设置的课程。有关的中、英文课本已有几十种之多。本书确实是一本好教材,我们使用该教材(第二版)教学已经五年多,体会到该书的诸多特点。实际上,世界上使用该课本的学校和班级非常之多,以至于根据众多使用该书的教师和读者的反馈建议,很快 Sanjit K. Mitra 教授推出了该教材的第三版。

第三版保持了原有的三个最显著的特点:

第一,在内容结构方面,本书的安排有很好的系统性和逻辑性,从信号到系统,从时域到变换域,从分析到处理,从基本内容到特殊技术,从原理到应用。本书结构的安排是作者在数字信号处理课程的教学中长期积累的经验的结晶。

第二,在授课方法上,本书每章都分三步:原理和方法的论述,大量例题和解题练习,计算机推演实验的练习。这是一个非常合理的教学步骤,非常有利于从学习基本原理(第一步)到掌握基本方法(第二步),有利于从理解基本技术(第二步)到学会实际应用(第三步)。

第三,在材料选择上,文中包含了大量实用的信号和系统及其分析,大量实际的数字信号处理问题的描述,还提供了大量的例题和习题。这些对自学和巩固学习内容有很大帮助。

第三版在结构上做了较大的调整,使之更适合教学;在内容上,增加了近些年发展而又广泛应用的技术:在数字信号分析方面,增加了两个有限长离散变换(离散余弦变换和 Hart 变换)以及其他一些数字信号独特的分析方法;在数字信号滤波方面,也增加了一些数字系统独特的运算方法,如 FIR 滤波器的特殊设计方法、插值处理等;另外,在例题和应用方面还增加了一些实用系统的分析和介绍。

该书(第三版)的中文译本几乎与原版影印改编教材同时问世,可以预计,该课本在我国的使用将会使得我们在该领域的教学紧跟世界水平,并将推动我们的教学工作更迅速地发展。需要注意的是,英文版原书附带有光盘一张,内容主要为 MATLAB 示例程序、信号文件、复习材料等;为读者计,在中文译本中,我们将光盘的内容放到了电子工业出版社的网站上([www.phei.com.cn/download/download.asp](http://www.phei.com.cn/download/download.asp)),读者可直接下载使用。同时,由于该教材的前 11 章主要针对高校的本科生,而后面的章节针对于研究生,因此在出版形式上我们将该书分为了上下两册,读者可根据需要选择阅读。

参加本书翻译和校对工作的还有陈嘉宇(第 1 章、第 5 章)、罗玮、杨浩(第 2 章)、王青、薛妮(第 3 章)、徐戈(第 5 章、第 6 章)、管鲍、胡意顺(第 7 章)、张永强、夏桂松(第 8 章)、向倩、余志雄(第 9 章、第 10 章)、杨勇(第 11 章)、黄培荣(第 12 章)、董航(第 13 章、第 14 章)、杨文(第 15 章),另外薛妮改编了中文版的索引,贺军整理了附录;最后由孙洪审校全书。

翻译中不妥和错误之处在所难免,敬请广大读者和同行批评指正。

# 序 言

数字信号处理(DSP)在过去的40年间取得了飞速的发展,在研究和应用方面也取得了显著的进步。推动这种发展与进步的是数字计算机技术和软件开发的进展。世界上几乎所有的电子和计算机工程系都开设了一门或几门数字信号处理方面的课程,最初步的课程通常在大学四年级开设。本书旨在作为大学四年级和研究生一年级学生的数字信号处理两学期课程的教材。本书也适合实际工程人员或研究人员自学。

尽管本书第二版仅仅在约三年前出版,但是根据采用这本书作为教材的教授和许多读者的反馈意见,很明显需要一个新的版本,以便反映对内容的修改建议。该版有三类变动:增加了大量的新内容,删除了一些内容,在内容的安排、结构上做了大幅度调整。另外,给出了更多的例题来解释那些难以理解的新概念。

第三版的一个大变动是将离散时间信号和系统的变换域描述分成了三章:一章是离散时间傅里叶变换(DTFT),另一章是离散傅里叶变换(DFT),还有一章是 $z$ 变换。有关离散时间傅里叶变换的章节中包括了连续时间信号和系统的连续时间傅里叶变换(CTFT)的简要复述,指出连续时间和离散时间傅里叶变换两者之间的相似和不同之处。在这一章中还讨论了线性时不变离散系统的频率响应的概念及其性质。该章还增加了DFT的讨论,包括另外两个有限长离散变换,即离散余弦变换和Haar变换。这两个变换经常用在信号压缩中。在 $z$ 变换的章节中给出了线性时不变离散时间系统的传输函数的概念。

第三版中的第二个大变动是将无限冲激响应(IIR)和有限冲激响应(FIR)数字滤波器设计分别在两章讨论。第三个大变动是将多速率数字信号处理分成两章:一章讨论多速率数字信号处理的基本概念,另一章讨论滤波器组和离散小波变换。最后,有关离散随机信号的内容放在附录中。

第三版新增加的内容有:连续时间傅里叶变换(见3.1节),相位展开函数(见3.7节),相位与群延时(见3.9节);傅里叶域滤波(见5.8节),离散余弦变换(见5.11节),Haar变换(见5.12节),有限长离散变换的能量压缩性质(见5.13节),基于幅度和相位特征的传输函数分类(见7.1节和7.2节),最小相位FIR滤波器设计(见10.4节),谱分解(见10.4节),高效计算的FIR滤波器设计(见10.6节),使用索引映射的快速傅里叶变换(见11.4节),滑动离散傅里叶变换(见11.6节),窄频带离散傅里叶变换计算(见11.7节),样条插值(见13.5节),离散小波变换(见14.6节),数字音乐合成(见15.7节),以及基于小波的信号压缩(见15.9节)。

本书的一个主要特点是,大量使用基于MATLAB<sup>①</sup>的例题来说明用程序解决信号处理问题具有很强的功能。本书采用了一种三步教学法的结构,以便充分利用MATLAB的优势,避免了“食谱”式方法解题的弊端。首先,每一章从讨论基本理论和算法开始。第二步,给出一些人工求解计算的实例。第三步,用MATLAB推演题解。开始时,尽量提供详细的MATLAB代码,以便学生在自己的计算机上重复这些例子。在每一章中,对常规理论问题要求分析求解,此外,还包括了大量需要用MATLAB求解的问题。本书只需要学生掌握初步的MATLAB知识。我们相信学生们通过使用验证过的完整程序可以加快掌握解决复杂问题的能力,然后可以自己编写一些简单的程序来求解指定的问题(这些问题在第2章到第15章的末尾)。

<sup>①</sup> MATLAB是位于马萨诸塞州Natick的MathWorks公司的注册商标,联系方式为508-647-7000, <http://www.mathworks.com>。



由于计算机的验证可以增强对基本理论的理解,所以与前两版一样,第三版给出了一个庞大的 MATLAB 程序库。第二版原有的 MATLAB 程序都已做了升级,可以在 MATLAB 的新版本下运行,也可以使用信号处理工具箱。另外,在本版中加进了新的 MATLAB 程序及其代码段。所有的程序都在本书附带的光盘中。读者可以运行这些程序来验证本书中的结果。课本中所有的程序和代码段已经在 MATLAB 7(Release 14)以及信号处理工具箱 6.2 版下测试过。本书中所列出的一些程序就执行速度而言,不一定是最快的,行数也不一定是最短的。但是在没有详细的解释情况下,它们在书写表达上是最清晰的。

本书第二个吸引人的特点是它包含了简单但很实用的例子。这些例子向读者展示了实际生活中的数字信号处理问题,我们可以使用计算机来解决这些实际问题。本书还涉及了当前的热门课题,它们没有出现在课本中。通过第 2 章到第 14 章后面的习题向读者介绍了其他一些课题。最后,本书在结尾的章节中专门讨论了一些重要的、实际的数字信号处理应用。这些应用很容易理解,不需要更高程度课程的知识。

本书附带的光盘中还含有一些有用的资料,例如真实的滤波器、复习材料、附加例题、常见问题解答(FAQ)以及 MATLAB 入门。在课文中,尽可能用地用光盘符号为读者指出光盘中的相关资料。我们希望收到读者对第三版的反馈意见,从而在下一版本中改进光盘的内容。

本书的先修课程是大学三年级关于线性连续时间和离散时间系统的课程,这在绝大部分学校都是必修课。本书提供了线性系统及其变换的简要复习,包括线性系统理论的基本内容,其中重要的内容用表格进行总结。这样,就可以在不明显增加课本厚度的情况下,包含较多的深入内容。

本书分为 15 章和一个附录。第 1 章介绍信号处理领域,并且概述信号和信号处理方法。

第 2 章讨论用数字序列在时域表示离散时间信号和离散时间系统,并描述常用的离散时间信号和系统的分类。然后介绍在任意离散时间信号和离散时间系统的时域定性分析中起着重要作用的几个基本离散时间信号和离散时间系统。接下来,描述了大量由一个或更多序列生成其他序列的基本运算。这些运算的组合还将用来构造离散时间系统。而用离散时间序列表示连续时间信号的问题仅作为一个特例来研究。

第 3 章讨论离散时间序列的离散时间傅里叶变换(DTFT)。我们从连续时间傅里叶变换(CTFT)的概述开始,然后引入 DTFT 及其逆变换,并讨论 DTFT 的收敛性。接着给出 DTFT 的性质,以及为除去 DTFT 的某些间断点所需的相位展开函数。最后引入线性时不变(LTI)系统频率响应的概念,并且详细讨论频率响应中相位延时和群延时之间的区别。

第 4 章主要讨论连续时间信号的离散时间处理。首先推导出一个带限连续时间信号在理想抽样下用离散时间表示的情况下,可从它的抽样形式完全恢复的条件。一些接口电路将用在连续时间信号的离散时间处理中。其中有两个电路是反混叠滤波器和由模拟低通滤波器构成的重构滤波器。因此,本章简述了一些常用模拟滤波器设计方法的基本理论,并且用 MATLAB 演示了它们的使用。本章讨论的其他接口电路还有抽样和保持电路、模数转换器和数模转换器。

第 5 章主要讨论离散傅里叶变换(DFT)。它在一些数字信号处理应用中起着重要的作用,例如它可以用做快速算法来有效地实现线性卷积。开始引入 DFT 及其逆变换,然后讨论其性质。本章还概述了离散余弦变换(DCT)和 Haar 变换。本章讨论的三种变换是有限长序列的正交变换的例子。

第 6 章讨论  $z$  变换。首先引入  $z$  变换及其逆变换,并且讨论其性质。然后详细讨论  $z$  变换的收敛条件。还讨论 LTI 离散时间系统的传输函数的概念及其与系统频率响应的关系。

本书基本上只涉及线性时不变离散时间系统,第 7 章讨论这种系统的变换域描述。此外,还将讨论变换域描述的特有性质,以及一些简单的应用。

线性时不变数字滤波器的硬件或软件实现的第一步是将基本模块互连起来的结构描述。结

构的描述可以揭示一些固有的内部变量与输入和输出之间的关系,反过来它是系统实现的关键。有多种不同的数字滤波器的结构形式,第8章将讨论其中的两种描述形式,然后讨论实因果 IIR 和 FIR 数字滤波器实现的一些常用方案。另外还将描述用来产生一对正交的正弦序列的 IIR 数字滤波器结构的实现方法。

第9章考虑 IIR 数字滤波器的设计问题。首先,讨论滤波器设计所涉及的问题。然后,描述 IIR 滤波器最常用的设计方法,即基于将一个原型模拟传输函数转换成一个数字传输函数的方法。此外,还将讨论经过频谱变换将一类 IIR 传输函数变换到另一类函数,最后讨论用 MATLAB 设计 IIR 数字滤波器。

第10章讨论 FIR 滤波器的设计问题。首先描述一种非常简单的 FIR 滤波器设计方法,然后讨论用计算机辅助方法来设计等波纹线性相位 FIR 数字滤波器的通用方法。最后,讨论用 MATLAB 设计 IIR 数字滤波器。

第11章涉及 DSP 算法的实现。首先讨论涉及到实现的两个主要问题。通过在计算机上使用 MATLAB 对数字滤波和 DFT 算法进行软件实现过程,说明其要点。接着讨论在数字设备中的数字和信号变量的各种表示方法,这是在第12章中讨论有限字长效应分析方法的基础。接下来讨论用来实现加法和乘法的一些算法,以及两个在数字信号处理中的主要算术运算,同时讨论算法的溢出处理。最后,本章列出用来设计和实现可调谐数字滤波器的两种常用方法,然后讨论某类特殊函数的逼近算法。

第12章着重分析不同来源的量化误差效应,描述对这些效应敏感度较小的结构。此外,还讨论系数量化效应。

第13章和第14章讨论多抽样率离散时间系统,它在不同的部分使用不同的抽样率。本章概述了变抽样率的基本概念和特性,数字滤波器的抽取和内插的设计,以及多抽样率滤波器组的设计。

第15章叙述数字信号处理的一些简单的实际应用。

本书的内容已在加州大学圣巴巴拉分校用做两个学期的数字信号处理课程,并经过了课堂上超过13年的仔细检验。基本框架是,从第2章到第8章是大学高年级的基础课程,第8章到第15章是研究生课程。

本书包含了352个例题、163个 MATLAB 程序、783个习题以及158个 MATLAB 练习。

我们尽最大努力保证本书中所有材料(包括 MATLAB 程序)的准确性。但是,我也非常感激读者指出课本上出现的任何我和出版社没有发现的错误。对于这些错误和任何评论,读者可以通过电子邮件的方式和我交流,我的电子邮件地址是 [mitra@ece.ucsb.edu](mailto:mitra@ece.ucsb.edu)。

最后,非常荣幸能有机会在我的教学生涯中与我的研究小组中出色的学生一起工作长达40多年。在与他们的交流与合作中,我受益匪浅,谨以此书向他们表示衷心的感谢。

Sanjit K. Mitra

## 致 谢

本书第一版的完整初稿经过了下述人员的审阅:克罗地亚萨格勒布大学的 Hrvoje Babic 博士,杜克大学的 James F. Kaiser 博士,奥地利维也纳大学的 Wolfgang F. G. Mecklenbräuker 博士,以及加州理工大学的 P. P. Vaidyanathan 博士。草稿经过了下述人员的审阅:微软公司的 Roberto H. Bambmerger 博士,普度大学的 Charles Boumann 博士,明尼苏达大学的 Kevin Buckley 博士,南卫里公会大学的 John A. Flemming 博士和 Jerry D. Gibson 博士,所罗门大学的 John Gowdy 博士,加州理工学院的 James Harris 博士和 Mahmood Nahvi 博士,波特兰州立大学的 Yih-Chyun Jenq 博士,波士顿大学的 Troung Q. Ngyuen 博士,以及亚利桑那州立大学的 Andreas Spanias 博士。该草稿的许多内容还受到了如下人员的审阅:莱斯大学的 C. Sidney Burrus 博士,AT&T 实验室的 Richard V. Cox 博士,加州大学圣迭哥分校的 Ian Galton 博士,乔治亚理工学院的 Nikil S. Jayant 博士,挪威科技大学的 Tor Ramstadvad 博士,Wright 州立大学的 B. Ananth Shenoi 博士,德国俄勒根-纽伦堡大学的 Hans W. Schüssler 博士,以及俄勒冈州立大学的 Richard Schreier 博士和 Gabor C. Temes 博士。

第二版经过了如下人员的审阅:北卡罗莱纳州立大学的 Winser E. Alexander 博士,罗切斯特工学院的 Sohail A. Dianat 博士,印度工学院的 Suhash Dutta Roy 博士,北达科他州立大学的 David C. Farden 博士,苏丹 Qaboos 大学的 Abdulsasir Y. Hossein 博士,杜克大学的 James F. Kaiser 博士,安捷伦实验室的 Ramakrishna Kakarala 博士,奥地利维也纳大学的 Wolfgang F. G. Mecklenbräuker 博士,南加州大学的 Antonio Ortega 博士,Auburn 大学的 Stanley J. Reeves 博士,马里兰大学的 George Symos 博士,以及麻省理工学院的 Gregory A. Wornell 博士。该手稿的许多内容还受到了如下人员的审阅:哥伦比亚大学的 Dimitris Anastassiou 博士,佛罗里达州立大学的 Rajendra K. Arora 博士,罗得岛大学的 Ramdas Kumaresan 博士,加州大学圣巴巴拉分校的 Upamanyu Madhow 博士,纽约布鲁克林理工学院的 Ivan Selesnick 博士,俄勒冈州立大学的 Gabor C. Temes 博士。

第三版经过了如下人员的审阅:新西兰 Massey 大学 Donald G. Bailey 博士,意大利罗马大学的 Marco Carli 博士,明尼苏达大学的 Emad S. Ebbini 博士,塔斯克基大学的 Chandrakanth H. Gowda 博士,奥斯汀得克萨斯大学的 Robert W. Heath, Jr 博士,史蒂文斯工学院的 Hongbin Li 博士,加州大学 Riverside 分校的 Ping Liang 博士,俄勒冈州立大学的 Luca Lucchese 博士,迈阿密大学的 Kamal Premaratne 博士,Rutgers 大学的 Lawrence R. Rabiner 博士,威斯康星州密尔沃基大学的 Ali M. Reza 博士,新奥尔良大学的 Terry E. Riemer 博士,得克萨斯 A&M 大学的 Erchin Serepudin 博士,以及阿克伦城大学的 Okechukwu C. Ugweje 博士。该手稿的许多内容还受到了如下人员的审阅:加州大学圣巴巴拉分校的 Shivkumar Chandrasekaran 博士,拉斯克鲁斯新墨西哥州立大学的 Charles D. Creusere 博士,新加坡南洋理工大学的 Yong-Ching Lim 博士和 Kai-Kwang Ma 博士,MathWorks 有限公司的 Ricardo Losada 先生,斯坦福大学的 Julius O. Smith 博士,加州大学圣迭哥分校的 Truong Ngyuen 博士。这里我要感谢他们有价值的意见,这些意见无疑对本书非常有用。

我的许多学生审阅了所有版本的各种手稿,并测试了许多 MATLAB 程序。我尤其要感谢 Charles D. Creusere, Rajeev Gandhi, Gabriel Gomes, Serkan Hatipoglu, 何志海, Michael Lightstone, 林应松, Luca Lucchese, Debargha Mukherjee, Norbert Strobel, Stefan Thurnhofer, Messrs, Mylene Queiroz de Farias, Hsin-Han Ho, Eric Leipnik, Michael Moore。我还要感谢加州大学圣巴巴拉分校 ECE 158 和 ECE 258A 课程的学生,感谢他们几年来的反馈,这些反馈帮助我使这本书增色不少。

感谢 Goutam K. Mitra 和 Alicia Rodriguez 为本书设计了封面。最后,我要感谢 Patricia Monohon 为本书的第三版准备了 LaTeX 文件。

## 补充

本书中所含的 MATLAB 程序都在本书附带的光盘中,也可通过匿名 FTP 从网站 [iplserv.ece.ucsb.edu](http://iplserv.ece.ucsb.edu) 的目录/pub/mitra/Book\_3e中获得。

由 Chowdary Adsumilli, Chin-chaye Koh, Gabriel Gomes, Hsin-Han Ho 和 Mylene Queiroz de Farias 完成的习题解答包含了所有习题以及 MATLAB 练习的答案,教员们可通过出版商获得该解答手册。

由作者编写的配套图书 *Digital Signal Processing Laboratory Using MATLAB*<sup>①</sup>,也可自 McGraw-Hill 出版社获得。

---

① 即《数字信号处理实验手册(MATLAB版)》,该书已由电子工业出版社出版。——编者注

# 目 录

<b>第 1 章 信号和信号处理</b> .....	1
1.1 信号的特征与分类 .....	1
1.2 典型的信号处理运算 .....	3
1.3 典型信号举例 .....	10
1.4 典型的信号处理应用 .....	17
1.5 为什么要进行数字信号处理 .....	28
<b>第 2 章 离散时间信号与系统</b> .....	32
2.1 离散时间信号 .....	32
2.2 典型序列与序列表示 .....	44
2.3 抽样过程 .....	51
2.4 离散时间系统 .....	53
2.5 LTI 离散时间系统的时域特性 .....	62
2.6 简单的互连方案 .....	70
2.7 有限维 LTI 离散时间系统 .....	72
2.8 LTI 离散时间系统的分类 .....	79
2.9 信号的相关 .....	81
2.10 随机信号 .....	85
2.11 小结 .....	86
2.12 习题 .....	86
2.13 MATLAB 练习 .....	92
<b>第 3 章 离散时间傅里叶变换</b> .....	93
3.1 连续时间傅里叶变换 .....	93
3.2 离散时间傅里叶变换 .....	97
3.3 DTFT 定理 .....	108
3.4 离散时间序列的能量密度谱 .....	113
3.5 带限离散时间信号 .....	114
3.6 用 MATLAB 计算 DTFT .....	115
3.7 展开相位函数 .....	116
3.8 LTI 离散时间系统的频率响应 .....	117
3.9 相位延时和群延时 .....	125
3.10 小结 .....	128
3.11 习题 .....	129
3.12 MATLAB 练习 .....	136

<b>第 4 章 连续时间信号的数字处理</b>	137
4.1 介绍	137
4.2 连续时间信号的抽样	138
4.3 带通信号的抽样	149
4.4 模拟低通滤波器设计	150
4.5 模拟高通、带通和带阻滤波器的设计	163
4.6 反混叠滤波器设计	167
4.7 抽样和保持电路	170
4.8 模数转换器	171
4.9 数模转换器	175
4.10 重构滤波器设计	178
4.11 抽样和保持运算的影响	181
4.12 小结	181
4.13 习题	182
4.14 MATLAB 练习	186
<b>第 5 章 有限长离散变换</b>	187
5.1 正交变换	187
5.2 离散傅里叶变换	188
5.3 FT 与 DFT 之间的关系以及它们的逆变换之间的关系	192
5.4 有限长序列的运算	196
5.5 有限长序列的分类	201
5.6 DFT 对称关系	205
5.7 离散傅里叶变换定理	208
5.8 傅里叶域滤波	213
5.9 实序列的 DFT 计算	213
5.10 用 DFT 实现线性卷积	216
5.11 离散余弦变换	222
5.12 Haar 变换	228
5.13 能量压缩性质	230
5.14 小结	232
5.15 习题	232
5.16 MATLAB 练习	241
<b>第 6 章 <math>z</math> 变换</b>	242
6.1 定义和性质	242
6.2 有理 $z$ 变换	245
6.4 逆 $z$ 变换	250
6.5 $z$ 变换的性质	257
6.6 有限长序列卷积的计算	264
6.7 传输函数	266

6.8	小结	275
6.9	习题	275
6.10	MATLAB 练习	282
<b>第 7 章</b>	<b>LTI 离散时间系统在变换域中的分析</b>	<b>283</b>
7.1	基于幅度特征的传输函数分类	283
7.2	基于相位特征的传输函数分类	290
7.3	线性相位 FIR 传输函数的类型	296
7.4	简单数字滤波器	304
7.5	互补传输函数	315
7.6	逆系统	319
7.7	系统识别	323
7.8	数字二端口网络	325
7.9	代数稳定性检测	327
7.10	小结	331
7.11	习题	332
7.12	MATLAB 练习	342
<b>第 8 章</b>	<b>数字滤波器的结构</b>	<b>345</b>
8.1	方框图表示	345
8.2	等效结构	348
8.3	FIR 数字滤波器的基本结构	349
8.4	IIR 数字滤波器的基本结构	353
8.5	基本结构的 MATLAB 实现	357
8.6	全通滤波器	360
8.7	可调谐 IIR 数字滤波器	367
8.8	IIR 抽头级联格型结构	369
8.9	FIR 级联格型结构	373
8.10	IIR 传输函数的并联全通实现	378
8.11	数字正弦余弦发生器	382
8.12	数字滤波器结构的计算复杂度	384
8.13	小结	385
8.14	习题	386
8.15	MATLAB 练习	393
<b>第 9 章</b>	<b>IIR 数字滤波器设计</b>	<b>395</b>
9.1	预备知识	395
9.2	IIR 滤波器设计的双线性变换法	399
9.3	低通 IIR 数字滤波器设计	403
9.4	高通、带通和带阻 IIR 数字滤波器设计	405
9.5	IIR 滤波器的谱变换	408
9.6	用 MATLAB 进行 IIR 数字滤波器设计	413

9.7	IIR 数字滤波器的计算机辅助设计 .....	416
9.8	小结 .....	418
9.9	习题 .....	418
9.10	MATLAB 练习 .....	422
<b>第 10 章</b>	<b>FIR 数字滤波器设计</b> .....	<b>424</b>
10.1	预备知识 .....	424
10.2	基于加窗傅里叶级数的 FIR 滤波器设计 .....	427
10.3	等波纹线性相位 FIR 滤波器的计算机辅助设计 .....	439
10.4	最小相位 FIR 滤波器的设计 .....	446
10.5	用 MATLAB 设计数字滤波器 .....	447
10.6	具有高效计算效率的 FIR 数字滤波器的设计 .....	459
10.7	小结 .....	469
10.8	习题 .....	470
10.9	MATLAB 练习 .....	475
<b>第 11 章</b>	<b>DSP 算法实现</b> .....	<b>478</b>
11.1	基本问题 .....	478
11.2	用 MATLAB 进行结构仿真和验证 .....	487
11.3	DFT 的计算 .....	492
11.4	基于序号映射的快速 DFT .....	504
11.5	使用 MATLAB 计算 DFT 和 IDFT .....	510
11.6	滑动 DFT .....	511
11.7	窄频带傅里叶变换 .....	512
11.8	数字表示 .....	516
11.9	算术运算 .....	519
11.10	溢出的处理 .....	523
11.11	可调谐数字滤波器 .....	524
11.12	函数逼近 .....	528
11.13	小结 .....	530
11.14	习题 .....	531
11.15	MATLAB 练习 .....	538



# 第1章 信号和信号处理

信号在我们的日常生活中扮演了重要的角色。我们经常遇到的信号有语音、音乐、图片和视频信号。信号是自变量如时间、距离、位置、温度和压力等的函数。例如,语音和音乐信号表示空间上某个点的空气压力,它是时间的函数。黑白图片是光强度的一种表示,它是两个空间坐标的函数。电视中的视频信号由称为帧的图像序列组成,是一个有三个变量的函数:两个空间坐标和一个时间坐标。

我们遇到的大多数信号都是自然产生的。然而,信号也可以通过人工合成或计算机仿真产生。信号携带着信息,而信号处理的目的是提取信号携带的有用信息。信息提取的方法取决于信号的类型以及信号中信息的性质。因此,粗略地讲,信号处理涉及信号的数学表示以及用以提取存在信息所执行的算法运算。信号可以用自变量的原始域中的基本函数表示,或者用变换域中的基本函数表示。同样,信息提取处理可以在信号的原始域或变换域中进行。本书涉及到信号的离散时间表示和相应的离散时间处理。

本章综述了信号和信号处理方法。首先,我们根据信号的分类来讨论信号的数学特性。接着,详细讨论一些典型的信号,并且描述它们携带的信息的类型。然后,通过一些实例演示并解释一些常用的信号处理运算。随后简要地概述一些典型的数字信号处理应用。最后,讨论数字信号处理的优点和缺点。

## 1.1 信号的特征与分类

根据自变量的特征以及函数的定义域,可以将信号定义成不同的类型。例如,自变量可以是连续的或离散的。同样,信号也可以是自变量的一个连续的或离散的函数。此外,信号可以是一个实值函数或一个复值函数。

信号可以由一个或多个源产生。在前一种情况下,它为标量信号;而在后一种情况下,它为向量信号,通常也称为多通道信号。

一维(1-D)信号是一个自变量的函数。二维(2-D)信号是两个自变量的函数。多维(M-D)信号是多个自变量的函数。语音信号是一个一维信号的例子,其中自变量是时间。图像信号,如照片,是一个二维信号的例子,其中的两个自变量是空间的两个变量。黑白视频信号的每一帧是一个二维图像信号,它是空间的两个离散变量的函数。而每一帧在离散时间上按顺序出现。因此,黑白视频信号可以看成是一个三维(3-D)信号的例子,其中三个自变量分别是两个空间变量和一个时间变量。彩色视频信号是由表示红、绿、蓝(RGB)三原色的三个三维信号组成的三通道信号。在传输中,将RGB电视信号转换成由亮度分量和两个色度分量组成的另一种三通道信号。

在指定的自变量上的信号的值称为信号的幅度。幅度随着自变量的变化称为波形。

对于一维信号,自变量通常标为时间。若自变量是连续的,则该信号称为连续时间信号。若自变量是离散的,则该信号称为离散时间信号。连续时间信号被定义在每个时刻,而离散时间信号被定义在离散时刻。因此,一个离散时间信号实质上是一个数字的序列。

具有连续振幅的连续时间信号通常称为模拟信号,语音信号就是模拟信号的一个例子。我们在日常生活中会经常遇到模拟信号,它通常以自然方式产生。用有限个数字表示的离散振幅值的