

国外电子与通信教材系列

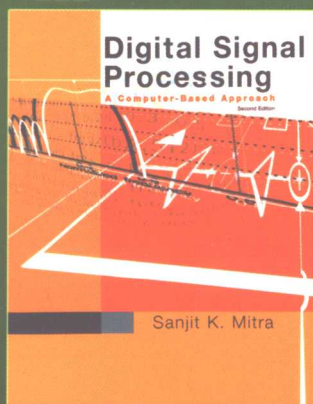
# 数字信号处理

—— 基于计算机的方法

· (第二版)

## Digital Signal Processing

A Computer-Based Approach, Second Edition



[美] Sanjit K. Mitra 著

孙洪 余翔宇 等译

Mc  
Graw  
Hill



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

(第二版)

Digital Signal Processing,  
A Computer-Based Approach  
Second Edition

[美] Sanjit K. Mitra 著

孙洪 余翔宇 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与系统、变换域中的离散时间信号、变换域中的 LTI 离散时间系统、连续时间信号的数字处理、数字滤波器的结构与设计与 DSP 算法实现、有限字长效应分析、多抽样率数字信号处理、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,并列举了多达 231 个示例。

本书可作为高等院校电子信息类专业本科生或低年级研究生的教材,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, Second Edition.**

ISBN 0-07-232105-9

Copyright © 2001 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 © 2005.

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: 01-2003-6240

### 图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理——基于计算机的方法(第二版)/(美)米特拉(Mitra, S. K.)著;孙洪等译.

北京:电子工业出版社,2005.1

(国外电子与通信教材系列)

书名原文: Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach, Second Edition

ISBN 7-121-00778-9

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第131174号

责任编辑:谭海平 特约编辑:李玉龙

印刷:北京东光印刷厂

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:47 字数:1203千字

印 次:2005年1月第1次印刷

定 价:65.00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 zlts@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。

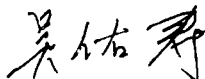
我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,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和自由组合使用。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、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
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 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	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、移动通信国家重点实验室主任
	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
	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委员
	郑宝玉	南京邮电学院副院长、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、电子与信息工程学院院长 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
	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、秘书长
	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 教育部电子信息科学与电气信息类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相关专业设置的课程,且中英文的有关课本我们已有几十种之多。本书确实是一本好教材,我们使用该教材教学三年来,体会到它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(第2章),从时域(第3章)到变换域(第4章~第5章),从分析(第3章~第5章)到处理(第6章~第9章),从基本内容到特殊技术(第10章),从原理到应用(第11章)。值得一提的是,本书将“A/D转换”内容安排在信号和系统在时域和频域上的分析之后,把A/D转换作为信号的一种处理过程,在时域和频域上对其基本原理和分析方法做了充分的讨论。这对以后的多抽样率信号处理、多分辨率分析等内容的进一步学习打下了基础。习惯上“A/D转换”的内容常常安排在课程开始,不便深入讨论,从而以后对数字信号的特殊运算“上抽”和“下抽”的分析就会有些困难。事实上,从多年学生的练习和考试中都暴露出对“A/D转换”的方法掌握不够,而只是记住了奈奎斯特定理给出的结论。本书很好地解决了这个问题,这只是一个例子。实际上,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。

本书由余翔宇博士做初步翻译,再由孙洪教授整理、再译。然后经过了两次审校:由余翔宇博士就原书存在的为数不少的错误与作者联系,得到作者对修正的认可;参加审校工作的还有孙洪(前言,第1章)、罗玮(第2章)、徐戈(第3章、第6章)、管鲍(第4章)、陈嘉宇(第5章)、向倩(第7章)、杨勇(第8章)、黄培荣(第9章)、董航(第10章)、杨文(第11章),另外薛妮改编了中文版的索引;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。

## 作者简介

Sanjit K. Mitra 在加利福尼亚大学伯克利分校获得电子工程专业的硕士和博士学位,并在芬兰坦佩雷理工大学获得名誉技术博士。1965 年以前,他在康奈尔大学担任副教授,之后在新泽西州 Holmdel 的美国电话电报公司贝尔实验室工作到 1967 年,此后他到加利福尼亚大学戴维斯分校工作。1977 年,Mitra 博士转到圣巴巴拉分校,1979 年到 1982 年,他在那里担任系主任,现在是电气和计算机工程系的教授。Mitra 博士已经发表了 500 多篇期刊和会议论文,出版了 11 本书并持有 5 项专利。他于 1986 年担任电气和电子工程师协会电路与系统学会的主席,目前担任着四种期刊的编辑工作,其中包括 *Multidimensional Systems and Signal Processing*, *Signal Processing*, *Journal of the Franklin Institute* 和 *Automatika*。Mitra 博士获得了许多著名的工业和学术奖,包括 1973 年的 Terman 奖、1985 年 AT&T 美国工程教育协会基金奖、1989 年电气和电子工程师协会电路与系统教育奖、1989 年德国洪堡基金的著名高级美国科学家奖、1996 年电气和电子工程师协会信号处理学会技术成就奖、1999 年 Mac Van Valkenburg 协会奖,以及电气和电子工程师协会电路与系统协会 CAS 五十周年纪念奖章、2000 年电子和电子工程师协会千禧奖章,等等。他是芬兰科学院院士。Mitra 博士是电气和电子工程师协会、美国艺术与科学研究院和国家光学工程学会的会士,并且是欧洲信号、语音和图像处理协会和美国工程教育协会的会员。



# 序 言

数字信号处理(DSP)在过去的三十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。

尽管本书第一版仅仅在两年出版,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。第二版增加了大量的新内容。同时,由于篇幅所限,删除了大量非常有趣但是没有实用价值的主题。另外,大家也认为需要用更多的例题来解释那些难以理解的新概念。

第二版中包括的新主题有:全解的计算、零输入响应、零状态响应和有限维离散时间系统的冲激响应(2.6.1节到2.6.3节),信号的相关及应用(2.7节),逆系统(4.9节),系统辨识(4.10节),匹配滤波器及应用(4.14节),带通信号的抽样(5.3节),高通、带通和带阻模拟滤波器的设计(5.5节),抽样和保持运算的效应(5.11节),高通、带通和带阻 IIR 数字滤波器设计(7.4节),用最小均方差设计 FIR 数字滤波器(7.8节),约束最小二乘 FIR 数字滤波器设计(7.9节),完全重构双通道 FIR 滤波器组(10.9节),余弦调制  $L$  通道滤波器组(10.11节),随机信号谱分析(11.4节),以及稀疏天线阵列设计(11.14节)。从第一版中删除的主题有:第2章的线性时不变离散时间系统的状态空间表示,第6章的信号流图表示和状态空间结构,第7章的 IIR 滤波器设计的冲激不变法和基于频率抽样方法的 FIR 滤波器设计,第9章的由状态空间结构减少乘积舍入误差,以及第11章的语音保密系统。关于用拉格朗日内插实现分数抽样率转换的内容移到了第10章。现在每一章的材料都组织得更加合理了。

本书的一个主要特点是,大量使用基于 MATLAB 的例题<sup>①</sup>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结构来充分利用 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,以便学生自己的计算机上重复这些例子。在每一章,除了要求分析求解的常规理论问题以外,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。我相信学生们通过使用验证过的完整程序,然后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11章的末尾),就可以更快地学会使用 MATLAB 求解复杂的问题。

由于计算机的验证可以增强对基本理论的理解,因此,同第一版一样,第二版给出了一个庞大的 MATLAB 程序库。第一版原有的 MATLAB 程序都已经做了升级,以便在 MATLAB 的新版本下运行并且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。读者可以运行这些程序来验证本书中的结果。该课本中总共有 90 个 MATLAB 程序,这些程序已在

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

MATLAB 5.3 版以及信号处理工具箱 4.2 版下测试过了。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,也不一定是最短的,但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 231 个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。本书还涉及了当前热门但还没有出现在课本中的一些主题。通过每章最后的习题,还向读者介绍了其他一些主题。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。

本书的先修课程是大学三年级的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,包括了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。

本书分成 11 章。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。然后介绍对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。接下来,描述了大量由一个或更多的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。最后,讨论离散时间随机信号的时域表征。

第 3 章集中讨论离散时间序列的变换域表示。特别讨论了离散时间傅里叶变换(DTFT)、离散傅里叶变换(DFT)和  $z$  变换。讨论这些变换的特性之后,列出了一些简单的应用。本章的结尾将讨论随机信号的变换域表示。

本书主要只关注线性时不变离散时间系统,第 4 章讨论了它们的变换域表示。本章研究了这些变换域表示的特殊性质,并考虑了若干简单的应用。

第 5 章主要集中讨论连续时间信号的离散时间处理。首先推导出了一个带限连续时间信号在理想抽样下用离散时间表示,使得从它的抽样形式可以完全恢复的条件。一些接口电路将用在连续时间信号的离散时间处理中。其中的两个是反混叠滤波器和重构滤波器,它们都是模拟低通滤波器。因此,本章还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有抽样和保持电路、模数转换器和数模转换器。

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 6 章将研究两种描述形式,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正弦序列的 IIR 数字滤波器结构的实现方法。

第 7 章考虑数字滤波器的设计问题。首先,讨论了滤波器设计所涉及的问题。然后,描述了 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。本章讨论了经过频谱变换将一类 IIR 传输函数变换到另一类函数。再后描述了一种非常简单的 FIR 滤波器设计方法。最后,本章简要讨论了 IIR 和 FIR 数字滤波器的计算机辅助设计,并给出了用 MATLAB 设计数字滤波器的示例。

第8章涉及DSP算法的实现。首先讨论了涉及到实现的两个主要问题。通过简述在计算机上使用MATLAB对数字滤波和DFT算法进行软件实现,说明了其要点。接着讨论了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9章中考虑的有限字长效应分析方法的基础。接下来讨论了用来实现加法和乘法的一些算法,以及这两个在数字信号处理中的主要算术运算,同时讨论了算法的溢出处理。最后,本章列出了用来设计和实现可调谐数字滤波器的两种常用方法,然后讨论了某类特殊函数的逼近算法。

第9章着重分析不同来源的量化误差效应,描述了对这些效应的敏感度较小的结构。此外,还包括了系数量化效应的讨论。

第10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11章叙述了数字信号处理的一些简单的实际应用。

本书的内容已在加利福尼亚大学圣巴巴拉分校用做两个季度的数字信号处理课程,并经过了课堂上超过10年的仔细检验。基本上,第2章到第6章是大学高年级课程的基础,第7章到第10章是研究生课程的框架。

根据课程表中其他课程所涉及的内容,该课本中的许多内容可以不放在课堂教学中。因为在绝大多数大学中,所有电子和计算机工程专业都将有关随机信号和系统的课程作为四年级的必修课,所以2.7节、3.10节及4.9节的内容可以从作为后续课程的数字信号处理中删掉。然而,这些内容在第9章中分析字长效应时很重要,并且我们建议不熟悉该内容的读者在学习第9章之前复习这部分内容。同样的原因,8.4节关于数字的表示以及8.5节关于算术运算的内容也可以删掉,因为大多数修数字信号处理课程的学生通常也修关于数字硬件设计的课程。

本书包含了231个例题、90个MATLAB程序、684个习题以及186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35年之久。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 Hrvoj 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。后一版的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 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 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。该手稿的许多部分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,圣迭哥加州大学的 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 Ramstad 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 和 Gabor C. Temes 博士。

第二版经过了如下人员的审阅:北卡罗来纳州立大学的 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 Abdulnasir 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。该手稿的许多部分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,圣巴巴拉加州大学的 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。

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两个版本的各种手稿,并测试了许多 MATLAB 程序。我尤其要感谢 Charles D. Creusere, Rajeev Gandhi, Michael Lightstone, 林应松, Luca Lucchese, Debargha Mukherjee, Norbert Strobel, Stefan Thurnhofer, Messrs, Serkan Hatipoglu, 何志海, Eric Leipnik, Michael Moore 以及 Mylene de Queiroz。我还要感谢圣巴巴拉加州大学 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 为本书的第二版准备了 LaTeX 文件。

## 补充

本书中包含的所有 MATLAB 程序可通过匿名文件传输协议(FTP)从网站 [iplserv.ece.ucsb.edu](http://iplserv.ece.ucsb.edu) 的目录/pub/mitra/Book(2e)中获得。

由 Rajeev Gandhi, Serkan Hatipoglu, 何志海, Luca Lucchese, Michael Moore 以及 Mylene de Queiroz 准备的解答手册, 包含了所有习题以及 MATLAB 练习的答案, 教员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* (《数字信号处理实验手册 (MATLAB 版)》), 该书也由电子工业出版社出版——编者注), 也可自 McGraw-Hill 出版社获得。

# 教学支持说明

McGraw-Hill 公司是美国著名的教育图书出版公司，出版了很多著名的计算机、工程类以及经营类图书。

我们十分重视教师手册等教学课件以及网上资源的使用。如果您确认将本书作为指定教材，请您务必填好以下表格并经系主任签字盖章后寄回我们的联系地址，McGraw-Hill 公司将向您提供英文原版的教师手册或其他教学课件。

情况调查表如下所示（复印有效）：

## 证 明

兹证明\_\_\_\_\_大学\_\_\_\_\_系/院\_\_\_\_\_专业\_\_\_\_\_学年（学期）  
开设的\_\_\_\_\_课程，共\_\_\_\_\_学时，现采用电子工业出版社出版的英文原版/简体中文  
版\_\_\_\_\_（书名/作者）作为主要教材。任课教师为\_\_\_\_\_，  
学生\_\_\_\_\_个班共\_\_\_\_\_人。

任课教师需要与本书配套的教师指导手册和习题解答。

电 话：\_\_\_\_\_

传 真：\_\_\_\_\_

E-mail：\_\_\_\_\_

联系地址：\_\_\_\_\_

邮 编：\_\_\_\_\_

建议和要求：

系 / 院主任：\_\_\_\_\_（签字）

（系 / 院办公室章）

\_\_\_\_\_年\_\_月\_\_日

## 请与我们联系

Publishing House of Electronics Industry

电子工业出版社：www.phei.com.cn

www.hxedu.com.cn

北京市万寿路 173 信箱外版教材事业部

联系电话：010-68270519

传 真：010-68270516

E-mail: Te\_service@phei.com.cn

McGraw-Hill Beijing Office

麦格劳-希尔北京代表处

地址：100086 北京市海淀区知春路 76 号

翠宫饭店写字楼 607 室

传真：010-62638354

E-mail: mghchina@mcgraw-hill.com.cn

http://www.mheducation.com

# 国外电子与通信教材系列部分图书

中文书名	英文书名	作者	译审者	版别
信息论与编码理论(第二版)	The Theory of Information and Coding, 2E	Robert J. McEliece	项海格	中、英
电路(第六版)	Electric Circuits, 6E	James W. Nilsson	路而红	中、英
工程电路分析(第六版)	Engineering Circuit Analysis, 6E	William H. Hayt, Jr.	王大鹏	中、英
射频电路设计:理论与应用	RF Circuit Design: Theory and Applications	Reinhold Ludwig	王子宇	中
电子学(第二版)	The Art of Electronics, 2E	Paul Horowitz	吴利民	中
数字电路简明教程	Digital Electronics: A Simplified Approach	Robert D. Thompson	高鹏	中
数字系统原理与应用(第九版)	Digital Systems: Principles and Applications, 9E	Ronald J. Tocci	贺煜耀	中
高速数字设计	High-Speed Digital Design: A handbook of Black Magic	Howard Johnson	王强	中、英
信号与系统(第二版)	Signals and Systems, 2E	Alan V. Oppenheim		英
信号与系统(第二版)	Signals and Systems, 2E	Simon Haykin	林秩盛	中、英
自适应滤波器原理(第四版)	Adaptive Filter Theory, 4E	Simon Haykin	郑宝玉	中、英
调制、检测与编码	Modulation, Detection and Coding	Tommy Oberg	项海格	中
合成孔径雷达:系统与信号处理	Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing	John C. Curlander	文江平	中
数字图像处理(第二版)	Digital Image Processing, 2E	Rafael C. Gonzalez	阮秋琦	中、英
数字图像处理(MATLAB版)	Digital Image Processing Using MATLAB	Rafael C. Gonzalez	阮秋琦	中、英
数字信号处理基础	Fundamentals of Digital Signal Processing	Joyce Van de Vegte	侯正信	中、英
数字信号处理引论(第二版)	Signal Processing First, 2E	James H. McClellan	周利清	中
小波与傅里叶分析基础	A First Course in Wavelets with Fourier Analysis	Albert Boggess	芮国胜	中、英
数字信号处理:基于计算机的方法(第三版)	Digital Signal Processing: A Practical Approach, 2E	Sanjit K. Mitra	孙洪	中
数字信号处理实践方法(第二版)	Digital Signal Processing: A Practical Approach, 2E	Emmanuel Ifeachor	罗鹏飞	中、英
Verilog HDL高级数字设计	Advanced Digital Design with the Verilog HDL	Michael D. Ciletti	张雅绮	中、英
VHDL数字系统设计(第二版)	Digital System Design with VHDL, 2E	Mark Zwolinski	李仁发	中、英
片上系统:可重用设计方法学(第三版)	Reuse Methodology Manual for System-on-a-Chip Design, 3E	Michael Keating	沈绪榜	中
半导体制造技术	Semiconductor Manufacturing Technology	Michael Quirk	韩郑生	中
半导体物理与器件(第三版)	Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles, 3E	Donald A. Neamen	赵毅强	中、英
数字集成电路:电路、系统与设计	Digital Integrated Circuits: A Design Perspective, 2E	Jan M. Rabaey	周润德	中
微电子电路(第四版)	Microelectronic Circuits, 4E	Adel S. Sedra		中、英
微系统设计	Microsystem Design	Stephen D. Senturia	刘泽文	中
电子电路设计基础	Introduction to Electronic Circuit Design	Richard R. Spencer	张为	中、英
芯片制造(第四版)	Microchip Fabrication: A Practical Guide to Semiconductor Processing, 4E	Peter Van Zant	赵树武	中
专用集成电路	Application-Specific Integrated Circuits	Michael J. S. Smith	章倩苓	中、英
CMOS模拟集成电路设计(第二版)	CMOS Analog Circuit Design, 2E	Phillip E. Allen	王志功	中、英
通信系统(第四版)	Communication Systems, 4E	Simon Haykin	沈连丰	中、英
通信系统工程(第二版)	Communication Systems Engineering, 2E	John G. Proakis	沈连丰	中、英
无线通信原理与应用(第二版)	Wireless Communications: Principles and Practice, 2E	Theodore S. Rappaport		英
无线通信与网络	Wireless Communications and Networking	John W. Mark	滕建辅	中
高级电子通信系统(第六版)	Advanced Electronic Communications Systems, 6E	Wayne Tomasi	薛荣华	中
现代通信系统(第二版)	Electronic Communications System, 2E	Roy Blake	张晋峰	中、英
数字通信:基础与应用(第二版)	Digital Communications: Fundamentals and Applications, 2E	Bernard Sklar	沈连丰	中、英
光纤通信(第三版)	Optical Fiber Communications, 3E	Gerd Keiser	李玉林	中
卫星通信(第二版)	Satellite Communications, 2E	Timothy Pratt	甘良才	中、英
视频处理与通信	Video Processing and Communications	Yao Wang	侯正信	中
天线(第三版)(上下册)	Antennas: For All Applications, 3E	John D. Kraus	章文勋	中
电磁波理论	Electromagnetic Wave Theory	Jin Au Kong	吴季	中

● 更多图书信息, 请登录华信教育资源网: [www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn)

● 详细的资料索取与教辅支持, 请联系: 010-68270519, 68270516, [te\\_service@phei.com.cn](mailto:te_service@phei.com.cn)

# 目 录

<b>第 1 章 信号和信号处理</b> .....	1
1.1 信号的特征和分类 .....	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 .....	18
1.5 为什么要进行数字信号处理 .....	30
<b>第 2 章 离散时间信号与系统的时域分析</b> .....	34
2.1 离散时间信号 .....	34
2.2 典型序列和序列表示 .....	45
2.3 抽样过程 .....	51
2.4 离散时间系统 .....	53
2.5 线性时不变离散时间系统的时域描述 .....	60
2.6 有限维线性时不变离散时间系统 .....	67
2.7 信号的相关 .....	75
2.8 随机信号 .....	80
2.9 小结 .....	89
2.10 习题 .....	89
2.11 MATLAB 练习 .....	96
<b>第 3 章 离散时间信号的变换域分析</b> .....	99
3.1 离散时间傅里叶变换 .....	99
3.2 离散傅里叶变换 .....	110
3.3 DTFT 和 DFT 以及它们的逆之间的关系 .....	116
3.4 DFT 的性质 .....	119
3.5 实序列 DFT 的计算 .....	124
3.6 用 DFT 实现线性卷积 .....	126
3.7 $z$ 变换 .....	132
3.8 有理 $z$ 变换的收敛域 .....	136
3.9 逆 $z$ 变换 .....	141
3.10 $z$ 变换的性质 .....	147
3.11 随机信号的变换域表示 .....	149
3.12 小结 .....	152
3.13 习题 .....	153
3.14 MATLAB 练习 .....	169
<b>第 4 章 线性时不变离散时间系统在变换域中的分析</b> .....	171
4.1 有限维线性时不变离散时间系统 .....	171
4.2 频率响应 .....	171



4.3	传输函数	181
4.4	传输函数的类型	187
4.5	简单数字滤波器	197
4.6	全通传输函数	206
4.7	最小相位与最大相位传输函数	208
4.8	互补传输函数	209
4.9	逆系统	214
4.10	系统辨识	216
4.11	数字二端口网络	219
4.12	代数稳定性检测	221
4.13	随机信号的离散时间处理	225
4.14	匹配滤波器	230
4.15	小结	233
4.16	习题	234
4.17	MATLAB 练习	249
<b>第 5 章</b>	<b>连续时间信号的数字处理</b>	<b>252</b>
5.1	介绍	252
5.2	连续时间信号的抽样	253
5.3	带通信号的抽样	262
5.4	模拟低通滤波器设计	264
5.5	模拟高通、带通和带阻滤波器的设计	279
5.6	反混叠滤波器设计	283
5.7	抽样和保持电路	285
5.8	模数转换器	286
5.9	数模转换器	291
5.10	重构滤波器设计	295
5.11	抽样和保持运算的影响	297
5.12	小结	298
5.13	习题	299
5.14	MATLAB 练习	302
<b>第 6 章</b>	<b>数字滤波器的结构</b>	<b>303</b>
6.1	方框图表示	303
6.2	等效结构	306
6.3	FIR 数字滤波器的基本结构	307
6.4	IIR 数字滤波器的基本结构	311
6.5	基本结构的 MATLAB 实现	316
6.6	全通滤波器	319
6.7	可调谐 IIR 数字滤波器	327
6.8	IIR 抽头级联格型结构	330
6.9	FIR 级联格型结构	334
6.10	IIR 传输函数的并联全通实现	340
6.11	数字正弦余弦发生器	343