



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

数字信号 与图像处理

翻译版

DIGITAL SIGNAL AND IMAGE PROCESSING

• TAMAL BOSE

吴镇扬 周琳 等译



高等教育出版社
Higher Education Press



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

数字信号 与图像处理

翻译版

DIGITAL SIGNAL AND
IMAGE PROCESSING

• TAMAL BOSE

吴镇扬 周琳 等译



高等教育出版社
Higher Education Press

图字: 01 - 2003 - 8862 号

Digital Signal and Image Processing, 1e

Copyright 2004© John Wiley & Sons, Inc.

All Rights Reserved.

AUTHORIZED TRANSLATION OF THE EDITON PUBLISHED BY JOHN WILEY & SONS,
New York, Chichester, Brisbane, Singapore AND Toronto. No part of this book may be
reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Inc.

图书在版编目(CIP)数据

数字信号与图像处理: 翻译版/(美)博斯(Bose,T.);
吴镇扬, 周琳等译. —北京: 高等教育出版社, 2006. 7

书名原文: Digital Signal and Image Processing

ISBN 7 - 04 - 018468 - 0

I. 数... II. ①博... ②吴... ③周... III. ①数字
信号 - 信号处理 - 高等学校 - 教材②图像处理 - 高等学校 -
教材 IV. TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 060857 号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landaco.com
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司		http://www.landaco.com.cn
印 刷	涿州市星河印刷有限公司	畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787 × 960 1/16	版 次	2006 年 7 月第 1 版
印 张	47	印 次	2006 年 7 月第 1 次印刷
字 数	850 000	定 价	58.00 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 18468-00

内 容 提 要

本书是美国 Utah 州立大学电气与计算机工程系主任 Tamal Bose 教授总结多年在数字信号处理方面的科研经验和教学经验, 于 2004 年推出的一部力作。本书除介绍数字信号处理的基本理论外, 还包括数字信号处理的另外两个重要分支——自适应信号处理(ASP)和数字图像处理(DIP)。按照经典数字滤波至自适应滤波的扩展, 一维概念至二维概念的扩展, 作者有机地将 DSP、ASP 和 DIP 三方面的理论结合在一起, 构成了一本体系完整的教材。本书概念清晰, 数学推导形式简单却又不失严谨, 并且引入了国际上流行的用于科学计算的 MATLAB 语言。同时, 本书还包含了丰富的例题和大量综合性的习题和上机练习题, 便于教学或自学, 适合作为电类专业本科高年级和研究生教材, 对相关专业技术人员也不失为一本有益的参考书。

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给予严厉打击。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) 58581897/58581896/58581879

传 真：(010) 82086060

E - mail：dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编：100011

购书请拨打电话：(010)58581118

策划编辑	刘激扬
责任编辑	陈思宇
封面设计	李卫青
责任绘图	朱 静
版式设计	范晓红
责任校对	杨风玲
责任印制	陈伟光

序

20 世纪末，以计算机和通信技术为代表的信息科学和技术对世界经济、科技、军事、教育和文化等产生了深刻影响。信息科学技术的迅速普及和应用，带动了世界范围信息产业的蓬勃发展，为许多国家带来了丰厚的回报。

进入 21 世纪，尤其随着我国加入 WTO，信息产业的国际竞争将更加激烈。我国信息产业虽然在 20 世纪末取得了迅猛发展，但与发达国家相比，甚至与印度、爱尔兰等国家相比，还有很大差距。国家信息化的发展速度和信息产业的国际竞争能力，最终都将取决于信息科学技术人才的质量和数量。引进国外信息科学和技术优秀教材，在有条件的学校推动开展英语授课或双语教学，是教育部为加快培养大批高质量的信息技术人才采取的一项重要举措。

为此，教育部要求由高等教育出版社首先开展信息科学和技术教材的引进试点工作。同时提出了两点要求，一是要高水平，二是要低价格。在高等教育出版社和信息科学技术引进教材专家组的努力下，经过比较短的时间，第一批引进的 20 多种教材已经陆续出版。这套教材出版后受到了广泛的好评，其中有不少是世界信息科学技术领域著名专家、教授的经典之作和反映信息科学技术最新进展的优秀作品，代表了目前世界信息科学技术教育的一流水平，而且价格也是最优惠的，与国内同类自编教材相当。

这项教材引进工作是在教育部高等教育司和高教社的共同组织下，由国内信息科学技术领域的专家、教授广泛参与，在对大量国外教材进行多次遴选的基础上，参考了国内和国外著名大学相关专业的课程设置进行系统引进的。其中，John Wiley 公司出版的贝尔实验室信息科学研究中心副总裁 Silberschatz 教授的经典著作《操作系统概念》，是我们经过反复谈判，做了很多努力才得以引进的。William Stallings 先生曾编写了在美国深受欢迎的信息科学技术系列教材，其中有多种教材获得过美国教材和学术著作者协会颁发的计算机科学与工程教材奖，这批引进教材中就有他的两本著作。留美中国学者 Jiawei Han 先生的《数据挖掘》是该领域中具有里程碑意义的著作。由达特茅斯学院的 Thomas Cormen 和麻省理工学院、哥伦比亚大学几位学者共同编著的经典著作《算法导论》，在经历了 11 年的锤炼之后于 2001 年出版了第二版。目前任教于美国

Massachusetts 大学的 James Kurose 教授，曾在美国三所高校先后 10 次获得杰出教师或杰出教学奖，由他主编的《计算机网络》出版后，以其体系新颖、内容先进而备受欢迎。在努力降低引进教材售价方面，高等教育出版社做了大量和细致的工作。这套引进的教材体现了权威性、系统性、先进性和经济性等特点。

教育部也希望国内和国外的出版商积极参与此项工作，共同促进中国信息技术教育和信息产业的发展。我们在与外商的谈判工作中，不仅要坚定不移地引进国外最优秀的教材，而且还要千方百计地将版权转让费降下来，要让引进教材的价格与国内自编教材相当，让广大教师和学生负担得起。中国的教育市场巨大，外国出版公司和国内出版社要通过扩大发行数量取得效益。

在引进教材的同时，我们还应做好消化吸收，注意学习国外先进的教学思想和教学方法，提高自编教材的水平，使我们的教学和教材在内容体系上，在理论与实践的结合上，在培养学生的动手能力上能有较大的突破和创新。

目前，教育部正在全国 35 所高校推动示范性软件学院的建设和实施，这也是加快培养信息科学技术人才的重要举措之一。示范性软件学院要立足于培养具有国际竞争力的实用性软件人才，与国外知名高校或著名企业合作办学，以国内外著名 IT 企业为实践教学基地，聘请国内外知名教授和软件专家授课，还要率先使用引进教材开展教学。

我们希望通过这些举措，能在较短的时间，为我国培养一大批高质量的信息技术人才，提高我国软件人才的国际竞争力，促进我国信息产业的快速发展，加快推动国家信息化进程，进而带动整个国民经济的跨越式发展。

教育部高等教育司

二〇〇二年三月

译者序

数字信号处理(DSP)技术真正得到应用迄今还不到半个世纪,但是它却从根本上改变了信息产业的面貌。特别是近十年来,由于超大规模集成电路的出现,数字信号处理在理论和应用方面有了惊人的发展,在越来越多的应用领域中迅速替代传统的模拟信号处理方法,并且不断开辟出许多新的应用领域。数字信号处理及其派生课程已是目前高等学校各电类专业不可缺少的课程,许多生物医学、机械、动力以及土木建筑等专业的学生也在选修数字信号处理方面的相关课程。

本书除介绍数字信号处理的基本理论外,还包括数字信号处理的另外两个重要分支——自适应信号处理(ASP)和数字图像处理(DIP)。按照经典数字滤波至自适应滤波的扩展,一维概念至二维概念的扩展,作者浓缩了DSP、ASP和DIP的精华内容,有机地将这三方面的理论结合在一起,构成了一本体系完整的教材。不同专业可以对该书的内容作适当的组合构成一门或多门课程,按各自的培养目标组织教学。

该书还有一些特点:概念清晰、数学推导形式简单却又不失严谨性;教材引入了国际上流行的用于科学计算的MATLAB语言,大多数章节后面均简单地介绍了有关的MATLAB命令;大量综合性的习题和上机练习题有助于学生灵活掌握各章节的内容,加强基本概念的训练;书中有丰富的经过精心设计的例题,这些例题形象生动、概念清晰、有助于理解书中给出的各种结论。

该书的作者Tamal Bose教授为Utah州立大学电气与计算机工程系主任。作者在数字信号处理方面有着丰富的科研和教学经验。该书出版前后,作者在Colorado大学Denver分校、Colorado大学Boulder分校和Utah州立大学等多所学校讲授了书中的内容。

本书是由东南大学无线电工程系从事数字信号处理与数字图像处理的有关师生共同翻译的。吴镇扬教授负责全书的名词协调和统一,并负责译校本书的第2、3、4、7、11章,周琳博士负责译校本书的第1、5、6、8、9、10章以及附录,参加初译的有东南大学无线电工程系的博士、硕士研究生,他们是高建坡、胡红梅、马浩、王煜坚、万枫丹、杨浩、张琦等同学,张素卿同学参加

了图稿的编排工作。该书的中译本是他们辛勤劳动的结果。

由于作者水平所限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

译者

2006年1月

前 言

这本教材的独特之处在于本书涵盖了数字信号处理(DSP)、自适应信号处理(ASP)和数字图像处理(DIP)的基础知识。利用这本教材,读者可以对这几个重要学科的不同组合内容进行学习。

数字信号处理(DSP)是涉及处理各种类型数字信号的理论。与模拟信号相比,数字信号处理更容易、更灵活和更快速,这也正是DSP在过去三十年内日益发展成为一个重要领域的原因。微电子技术和计算机硬件的并行发展使得DSP日趋重要,并得到广泛应用。DSP涉及处理的工具、技术和算法。DSP算法在现代技术中随处可见,例如消费电子领域中的移动电话、家庭安全系统、数字手表、CD播放器、调制/解调器、高清晰电视(HDTV)、便携式数字助理、电子玩具、GPS系统和许多其它方面。航天和军事应用中,DSP算法几乎涉及所有方面,从飞行器控制和通信到复杂的导弹制导系统。

DSP的一个重要分支是自适应信号处理(ASP)。ASP涉及能够自适应于环境变化的算法的设计和实现。以车载电话为例,由于在空中传播,并且经过建筑物、其它交通工具及山坡的多次反射,电话接收到的是有失真的通信信号。此外,这种失真特性随着车辆位置的移动而发生变化,因此电话接收端必须采用算法对这种失真进行补偿,这就是自适应滤波算法。在其它许多类似应用中需要这种自适应算法,因此ASP理论变得极其重要。

DSP的另一个分支就是数字图像处理(DIP)。为了满足图像处理的应用,很多DSP技术推广到二维空间。由于应用广泛,DIP在过去二十年中日益重要。DIP算法用于图像增强、重建、压缩及其它的处理。这些算法应用于Internet和卫星中的图像传输和接收。数码相机和便携式摄影机中也使用DIP算法。而绝大多数计算机中的相片编辑软件不过就是这些图像处理算法的实现。

这本书主要用于DSP课程。作为一本DSP教材,该书的主要特点在于:(a)数学概念的清楚严密;(b)学生可以轻松地利用MATLAB实现书中的算法;(c)有关DSP内容的广泛性对于该课程的学习恰到好处;(d)大多数章节的最后都给出了基本MATLAB命令说明,帮助学生完成上机练习;(e)大多数章节都给出一维概念到二维概念的推广,这样除给出一维信号处理的例子,还可以采用图像

处理的实例,从而使课程更有趣;(f)每一章最后都给出综合性的上机练习题。

主要特色

- 本教材浓缩了 DSP、ASP 和 DIP 的精华内容。
- 本书没有为了追求简单而放弃对每个主题的充分严密的数学指导,并且书中的数学推导尽可能地给出简单的形式。
- 每一章都有上机练习题。不同于简短的计算机问题,这些综合性的习题要求学生必须掌握该章节中的多个知识点。
- 大多数章节最后都专门讨论 MATLAB 命令,有助于完成本章的上机练习题。
- 讨论一维信号处理同时讨论相应的二维信号处理,有助于一维概念到二维的平滑过渡。
- 本书材料精心组织, DSP、ASP 和 DIP 的内容可以独立授课。
- 本书介绍了许多的政府采用标准,例如 JPEG 无损和有损压缩标准,语音编码标准。这些标准的描述足够详细,因而可以利用上机练习实现这些算法。
- 附录给出了线性代数的基础知识,需要复习数学工具的读者可以进行参考。

内容概述

本书共有 11 章,外加一附录。附录主要介绍线性代数的基本概念,介绍了矩阵的基本运算和特性,然后讨论了特殊矩阵、范数及其各自特点,涉及的概念仅限于信号和图像处理。

第 1 章给出了信号与系统的基本概念,包括信号分类、系统分类、卷积、脉冲响应和滤波器类型等内容,同时给出了这些内容的二维扩展。

第 2 章专门讨论 Fourier 分析,描述了频域中信号处理系统的分析和设计所使用的各种 Fourier 技术。首先简短回顾了连续时间 Fourier 变换(CTFT),然后详细给出了离散时间 Fourier 变换(DTFT)及其特性,为讨论采样定理、频率响应和抽取/内插打下基础。同时还给出了离散 Fourier 变换(DFT)和基本的基 2 快速 Fourier 变换(FFT)。上述的概念推广到二维的图像处理系统中。

第 3 章主要专门介绍了 Z 变换,同时给出数字滤波器中的线性相位概念和滤波器的状态空间表示法。讨论了基于 FFT 的线性滤波算法,即重叠相加法和重叠保留法。描述了基于线性滤波的 DFT 算法。将部分内容推广到二维系统。

第 4 章给出了 FIR 和 IIR 滤波器的设计方法,推导了各种滤波器的实现结构,并对各自的优缺点进行讨论。二维 FIR 滤波器的设计方法是一维方法的直接扩展,最后说明了二维 IIR 滤波器的设计方法。

第 5 章首先回顾了抽取和内插的概念,并给出了在频域和 Z 域中进行这些操作的结果,从而推导了抽取和内插滤波器的实现结构,称为多相结构。为了

进行语音和图像压缩, 讨论了子带编码的概念, 从而引出滤波器组理论, 给出了简单的 DFT 滤波器组, 然后详细介绍了正交镜像滤波器组(QMF), 同时还给出了这些滤波器的设计方法。

第 6 章首先讨论定点和浮点数的表示方法, 然后描述了量化噪声的不同来源及其对数字滤波器的影响。介绍了分析和最小化噪声的方法。根据不同设计约束, 推导出稳定的并且具有最小量化噪声的滤波器结构。

第 7 章专门介绍自适应信号处理的基本概念, 并对相关矩阵和 Wiener 滤波等进行详细讨论。给出了最陡下降法和 Newton 法等简单的梯度搜索最优算法。推导并分析了最小均方(LMS)算法。接着探讨了频域自适应滤波方法, 从而引入块自适应算法的概念, 特别推导了块 LMS(BLMS)算法, 频域自适应滤波器(FDAF)和快速 LMS(FLMS)算法。

第 8 章给出了自适应滤波中的最小二乘算法, 详细描述了递归最小二乘(RLS)算法和 Euclidean 方向搜索(EDS)算法, 并通过信道均衡的例子说明了算法的应用。接着讨论了用于数据压缩的自适应脉冲码调制(ADPCM)。本章最后讨论了二维自适应滤波器, 并将 LMS 算法和 EDS 算法推广到了二维情况下, 图像处理的实例说明了这些算法的应用。

第 9 章讨论了线性预测的理论与应用, 首先介绍前向预测和后向预测的概念, 然后给出 Levinson - Durbin 算法。接着推导梯度自适应格型结构(GAL), 并讨论了该算法的优点和计算复杂度。语音编码是线性预测的重要应用, 讨论了多种语音编码技术, 包括波形编码、变换编码、子带编码和线性预测编码, 并介绍了基于这些算法的语音编码标准。

第 10 章专门介绍了图像处理的基础知识, 首先介绍图像增强的方法, 接着讨论包括线性和多项式技术的图像插值方法, 给出了边缘检测的概念并详细讨论了不同的实现方法。详细讨论了包括逆滤波、低通滤波和中值滤波等图像恢复技术。最后给出了彩色图像处理的基本知识。

第 11 章给出了图像压缩和编码的基础知识, 给出了不同的图像变换方法, 并进行了数学推导和特性分析。然后详细介绍了二维 DPCM。给出了两种流行的图像编码算法: Huffman 编码和 Lempel - Ziv - Welch(LZW)编码。最后简要讨论了 JPEG 标准的有损和无损压缩算法。

可选择的课程方案

根据不同的内容选择, 该教材可以用于很多课程。在 Colorado 大学 Denver 分校、Colorado 大学 Boulder 分校和 Utah 州立大学, 利用本书内容, 我讲授了数字信号处理(DSP)、自适应信号处理(ASP)和数字图像处理(DIP)等课程。

学习本书的必备知识(a)微积分基本知识(b)微分方程和(c)计算机初级知识。不需要离散时间系统理论的预备知识。下面给出了关于课程的一些建议。

本科课程(无需 DSP 预备知识)

√整章

课 程	第 1 章	第 2 章	第 3 章	第 4 章	第 5 章	第 6 章	第 7 章	第 8 章	第 9 章	第 10 章	第 11 章
DSP: 一学期	√ 不含 二维	√ 不含 二维	√ 不含 二维	√ 不含 二维	可 选	可 选					
DSP + DIP: 一学期	√	√	√	可 选						可 选	
DSP + ASP: 一学期	√ 不含 二维	√ 不含 二维	√ 不含 二维	可 选			可 选	可 选			
DSP + DIP + ASP: 一学期	√ 不含 二维	√ 不含 二维	√ 不含 二维				√			√	
DSP + DIP(课程 1): 半学期	√ 不含 二维	√ 不含 二维	√ 不含 二维	√ 不含 二维							
DSP + DIP(课程 2): 半学期	二 维 部 分	二 维 部 分	二 维 部 分	二 维 部 分						√	√
DSP + ASP(课程 1): 半学期	√ 不含 二维	√ 不含 二维	√ 不含 二维	√ 不含 二维							
DSP + ASP(课程 2): 半学期							√	√	√		

研究生课程(有一门 DSP 课程预备知识)

√整章

课 程	第 1 章	第 2 章	第 3 章	第 4 章	第 5 章	第 6 章	第 7 章	第 8 章	第 9 章	第 10 章	第 11 章
DSP + DIP	二维部分	二维部分	二维部分	二维部分	可选	可选				√	√
DSP + ASP					√	√	√	√	√		
DIP + ASP	二维部分	二维部分	二维部分	二维部分			√	√	可选	√	可选

补充说明

本书的网站是 <http://www.wiley.com/college/bose>。网站内容包括书中绝大多数计算机例子的 MATLAB 源代码, 同时还包括书中图表的 PowerPoint 幻灯片, 站点上还可以找到完整的解答手册。需要进行注册以获得电子版的文档资料。

我已尽力使本书没有错误, 但是不可避免地存在一些未被发现的错误。您可以在网站上找到本书的勘误表。如果您发现错误, 可以通过本书的网站告诉我, 我将不胜感谢。

致谢

为编写该书, 很多人作出了很大贡献。首先, 我要感谢我的合著作者。Colorado 大学 Boulder 分校的 Francois Meyer 博士撰写了第 10 章, Citadel 的 Mei-Qin Chen 博士撰写了关于线性代数基本知识的附录。

信号与图像处理领域的许多专家审阅了本书手稿, 衷心感谢他们的建议、评注和修正。这些审阅者包括 Arizona 州立大学的 Andreas Spanias 博士、Victoria 的 Agathoklis 大学的 Jim Schroeder、Texas A&M 大学的 Erchin Serpedin、San Jose 州立大学的 Artice Davis、Michigan 州立大学的 Charles Owen、Cal Poly San Luis Obispo 的 James Kang、Drexel 大学的 Stan Kesler 和 Auburn 大学的 Stanley Reeves 等。

我也要感谢我的学生。Guo Fang Xu 博士校对了前三章内容并编写了这些章节的习题。St. Cloud 州立大学的 Ratchaneekorn (Kay) Thamvichai 博士校对了一些章节, 并且是解答手册的主要编写者。Mike Larsen、Leah Roberts 和 John Bushman 校对并录入了章节的部分和解答手册。

我还要感谢编辑 Bill Zobrist, 他的工作是如此出色。并且感谢 Hermitage

出版社对这本书的帮助。特别的，我要感谢文稿编辑 Betty Pessagno 和作品经理 Larry Meyer。

最后，我要感谢我的家人对这项长期工作的支持。当我忙于编写书稿时，他们牺牲了大量的家庭时间来陪伴我。我谨以此书献给我的太太 Tammy 和我们的孩子 Cameren 和 Megana。

Tamal Bose

目 录

第 1 章 基本概念	1	IIR 滤波器	35
1.1 信号处理概述	2	1.7 随机过程基础理论	39
信号的分类	2	1.8 二维扩展	44
典型的 DSP 系统	5	二维序列	44
1.2 图像处理基础	8	二维系统	48
二维信号	8	1.9 小结	53
概述	10	1.10 MATLAB 函数	54
图像处理实例	12	MATLAB 帮助	54
1.3 基本信号	13	数据输入和访问	54
连续时间信号	14	矩阵操作	55
离散时间信号	16	绘图函数	55
周期信号	19	滤波命令	56
连续时间信号和离散时间 信号的频率关系	20	图像处理命令	56
1.4 系统分类	21	循环和条件结构	57
线性	21	1.11 习题	58
移不变性	22	1.12 上机练习	70
因果性	23	参考文献	73
1.5 线性移不变系统的 描述	24	第 2 章 Fourier 分析	75
差分方程	24	2.1 连续时间 Fourier 分析	77
脉冲响应	25	Fourier 级数	77
卷积的性质	29	连续时间 Fourier 变换 (CTFT)	80
稳定性	30	2.2 离散时间 Fourier 变换	84
1.6 数字滤波器的实现	32	DTFT 的性质	87
滤波器互联	33	功率谱密度	95
FIR 滤波器	34	2.3 采样定理	96
		2.4 抽取和内插	102

降采样	103	线性滤波	195
升采样	107	重叠相加法	195
2.5 离散 Fourier 变换		重叠保留法	196
(DFT)	110	3.9 利用线性滤波计算	
DFT 的性质	112	DFT	198
2.6 快速 Fourier 变换	119	Goertzel 算法	199
按时间抽取的 FFT	120	Chirp Z 变换 (CZT)	202
按频率抽取的 FFT	126	3.10 二维扩展	204
2.7 二维扩展	129	二维 Z 变换	205
二维 Fourier 分析	130	稳定性	208
关于计算方面的问题	140	3.11 小结	215
2.8 小结	145	3.12 MATLAB 命令	216
2.9 MATLAB 命令	146	3.13 习题	218
2.10 习题	147	3.14 上机练习	226
2.11 上机练习	156	参考文献	228
参考文献	158	第 4 章 滤波器的设计与实现	231
第 3 章 Z 变换和数字滤波器	160	4.1 FIR 滤波器设计	232
3.1 Z 变换	160	窗口设计法	234
3.2 Z 变换的性质	163	Kaiser 窗设计	241
3.3 逆 Z 变换	170	频率采样设计法	243
逆 Z 变换公式	170	其它 FIR 设计方法	248
利用留数求逆 Z 变换	171	4.2 IIR 滤波器设计	249
部分分式展开	172	脉冲响应不变法	249
3.4 因果性和稳定性	177	双线性变换法	251
稳定三角形	179	模拟滤波器设计	253
3.5 单边 Z 变换	180	频谱变换	264
3.6 线性相位的概念	182	4.3 滤波器结构	269
线性相位 FIR 滤波器	183	FIR 结构	269
线性相位滤波器的零点		IIR 结构	270
位置	187	直接 II_T 型	271
3.7 状态空间分析法	191	格型结构	276
状态空间描述	192	4.4 二维 FIR 滤波器设计	285
状态空间方程的求解	193	4.5 二维 IIR 滤波器设计	290
3.8 利用 DFT/FFT 进行		Shanks 法	291