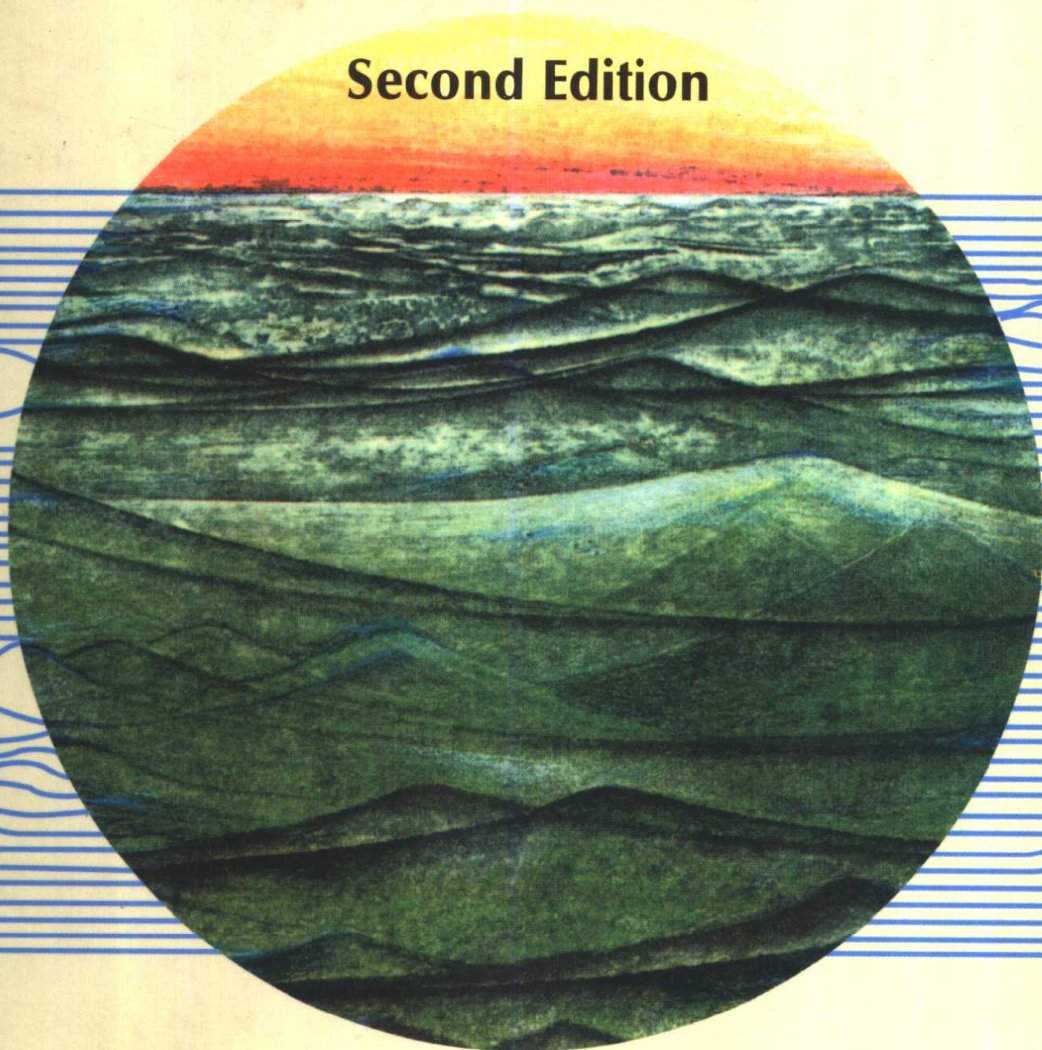


离散时间信号处理

(第2版)

DISCRETE-TIME SIGNAL
PROCESSING

Second Edition



[美] A.V.奥本海姆 R.W.谢弗

J.R.巴克

刘树棠 黄建国 译

西安交通大学出版社

Discrete-Time Signal Processing

离散时间信号处理

(第2版)

Alan V. Oppenheim

Massachusetts Institute of Technology

Ronald W. Schafer

Georgia Institute of Technology

with

John R. Buck

University of Massachusetts Dartmouth

[美] A.V. 奥本海姆 R.W. 谢弗

J.R. 巴克

刘树棠 黄建国 译

mt36 01

西安交通大学出版社

内 容 简 介

本书为美国麻省理工学院(MIT)著名教授 A. V. 奥本海姆和佐治亚理工学院(GIT)著名教授 R. W. 谢弗等人所著,系统论述了离散时间信号处理的基本理论和方法,是国际信号处理领域中的经典权威教材。1999年修订后推出了第2版。修订后的第2版更强调基础性和基本内容,全书由原来的12章缩为11章,内容更加精练,除保持了第1版基本概念清楚,层次安排合理,条理清晰,系统性强的特点外,还大幅度增加了例题和习题,并将习题按难度和复杂程度重新组合,同时增加了一些内容和习题答案,使本书更适合大学本科生和相关专业的研究生学习。

本书从第1版问世以来,一直是国际上颇受欢迎的大学本科高年级和研究生教材,相信经过修订的第2版更会得到我国广大读者的青睐。

本书可供从事数字信号处理工作的科技人员,高等学校有关专业的高年级学生、研究生及教师使用。

Authorized translation from the English language edition published by Prentice-Hall, Inc.

Copyright © 1999

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from the Publisher.

Chinese Simplified language edition published by Xi'an Jiaotong University Press

Copyright © 2000

本书中文简体字版由美国 Prentice-Hall 出版公司授权西安交通大学出版社出版发行,未经出版者书面许可,不得以任何方式复制和抄袭本书的任何部分。

版权所有,翻印必究。

图书在版编目(CIP)数据

离散时间信号处理:第2版/(美)奥本海姆(Oppenheim, A. V.),
(美)谢弗(Schafer, R. W.), (美)巴克(Buck, J. R.)著;刘树棠,黄建国
译. —西安:西安交通大学出版社,2001.9

书名原文:Discrete-Time Signal Processing

ISBN 7-5605-1465-0

I. 离… II. ①奥… ②谢… ③巴… ④刘… ⑤黄… III. 离散
信号:时间信号-信号处理-高等学校-教材 IV. TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 063531 号

*

西安交通大学出版社出版发行

(西安市兴庆南路25号 邮政编码:710049 电话:(029)2668315)

陕西省轻工印刷厂印装

各地新华书店经销

*

开本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:45.25 字数:1 092 千字

2001年9月第1版 2001年9月第1次印刷

印数:0 001~5 000 定价:78.00 元

陕版出图字:25—2000—071 号

发行科电话:(029)2668357,2667874

译者的话

随着数字信号处理学科理论和方法的日臻完善,处理手段和技术的日益先进,以及所涉及的应用领域愈来愈广泛,有必要将 20 多年来陆续在各大学开设的“数字信号处理”课程完全定位在大学本科生的层面上。这是译者认为作者在该书第 1 版(1989 年)出版 10 年后推出第 2 版的最主要初衷。这本教材的第一代是作者于 1975 年写的《Digital Signal Processing》一书。当时这门课只在少数几所大学,而且毫无例外地都在研究生的层次上开设。到了 1989 年,作者推出了第二代的《Discrete-Time Signal Processing》,这时这门课已在大多数大学开设,其对象是研究生和大学本科高年级学生。该书的体系和内容较前已做了大幅度的调整。进入 20 世纪 90 年代,这门课几乎毫无例外地在各大学本科中开设,而且所涵盖的学生的专业领域也大为拓宽。这一状况基本上与我国情况相符。这一过程既反映出学科发展、技术进步和应用广泛的进程,也伴随着在教材内容和组织上的演变过程。

针对以本科生为主的教材,又面临着发展如此迅速,内容如此丰富和涉及应用领域如此广泛的这样一本教材,应该首先考虑的是什么问题? 作者认为对于这样一类教材应该首先考虑的是:不是要企图去“涵盖”学科发展中的方方面面,而应该努力去“揭开”它的最基础和最核心的东西,并要让广大学生和工程师们易于接受。正因为如此,才使作者已写就的几本书普遍受到欢迎,广泛被采用,并经久不变,视为经典著作,享有很高的声誉。基于此,本书在第 1 版的基础之上作了如下处理:

(1) 由于在过采样的 A/D, D/A 转换和数字滤波器实现中,多采样率信号处理理论和方法的重要性,而大大扩充了这方面的内容;由于在数据压缩标准中所起的核心作用而增加了余弦变换。

(2) 由于倒谱概念及其同态变换方法从本科生的层面上看并不是一个最基本的内容而在正文中被剔除,放在习题中作为扩充内容,或者拟放在研究生的专题课中去讨论。

(3) 大大加大习题(由原 371 道题扩大到 588 道题)和例题(由原 113 道题扩大

到 137 道题)的数量,并将每一例题都冠以标题,以突出它的作用。

(4)重组习题。将习题分为 3 个档次(基本题、深入题和扩充题)和 4 种类型,并对第 1 类基本题给出答案。

除此以外,我们认为第 1 版和第 2 版就基本上属于大同小异了。该书第 1 版中译本自 1998 年出版以来,已获得较好反响。我们再次联手及时将第 2 版中译本奉献给读者,盼望能为读者所接受,并诚恳接受来自各方面的批评和指正。

本书前言和前 6 章由刘树棠译,后 5 章及附录由黄建国译。黄建国的研究生刘科伟和孙毅参与部分翻译和译稿的整理工作。西北工业大学张群飞副教授在整个工作过程中给予了很大的支持。译者对此均表示诚挚地感谢。感谢西安交通大学出版社总编杨鸿森教授、白居宪编审和总编办主任赵丽萍副编审在组织出版和编辑工作中所给予的支持。最后,对我们的家人孙漪和郑家梅同志,在她们自己繁忙的工作之余所给予的帮助和支持,特别是在近几年来持续不断的翻译工作中所给予的鼓励和忍耐精神表示深深地愧疚和衷心地感谢。

刘树棠于西安交通大学
黄建国于西北工业大学

前 言

这本书是我们于1975年出版的《Digital Signal Processing》一书第二代的继续。在当时,数字信号处理的技术领域虽处于它的初期,但是已经显露出的一些基本原理而可以将它们组织成一个完整而有关联的整体。尽管当时在几所学校已经有了这样一些课,但是几乎全都是属于研究生的课程。最初的教科书就是专门为这类课程写就的。

到了1985年,研究的步伐和集成电路技术都表明,数字信号处理该实现它在70年代就已显露出的巨大潜力了。数字信号处理(DSP)所萌发出的重要性清楚地表明对原书进行修订和更新内容是势在必行的了。然而,在筹划那个修订本时,由于已经出现的很多变化,很显然最合适的是在原书的基础之上重写一本新书,而同时又让原书仍然可以出售。我们将那本新书定名为《Discrete-Time Signal Processing》以强调该书所讨论的大部分理论和设计方法一般都是面向离散时间系统应用的。

到了1989年,《Discrete-Time Signal Processing》这本书出版时,DSP的基本原理已经普遍在大学本科阶段讲授了;有时甚至作为在有关线性系统第一门课中的一部分内容,或者在第3和第4学年稍微高深一些的档次上讲授,或者作为最初的研究生专题课中讲授。因此,认为在像线性系统、采样、多采样率信号处理、应用以及谱分析等方面的内容处置上大为扩展一些是合适的。另外,还用更多的例题来强调和说明一些重要概念。同时,我们还将那些业已表明对离散时间信号处理的理解不是最基本的一些内容进行了删除和浓缩。我们始终把精心构造的例题和家庭作业放在重要的地位,所以这本新书包括了400多个习题。

在这10年内,或者说自从《Discrete-Time Signal Processing》出版以来,一些重要的新概念已经建立,数字集成电路的容量成指数增长,以及涌现出日益扩大的应用领域;然而所包含的基本原理和基础性的内容仍然基本上是相差不多的,尽管在突出的重点上,理解上和教学方法上作了一些垂炼。因此,作为在今天强调DSP基本原理的一本教科书,我们来看一看对于《Discrete-Time Signal Processing》一书为使其仍具有当代水平而需要什么的时候,发现所需要的变化是远远少于先前的。在构思现在这本修订本时,我们的主导原则是:一本基础性教科书的主要目的是要揭示一个学科而不是要包罗一个学科。为此,现在这个修订本的目的就是要让离散时间信号处理这一学科甚至对大学生和实际工程师们都更加以可理解和接受,而不用在基本内容范围上作出过多考虑。为了这个目的,由于多速率信号处理在过采样的模数(AD)/数模(D/A)转换和数字滤波器实现中的重要性,我们大大扩展了在这方面的内容。由于余弦变换在数据压缩标准中起着核心的作用,也增添了余弦变换的讨论。同时,还删除了我们认为在现在的讨论范围内不太重要的一些内容,或者是放在更为深入一些教科书和高年级研究生课程中更为合适些的内容。有一些从正文中删除的概念(如有关倒谱的基本结果)已经放在新的课外习题中了。

这一修订本强调的一个主要部分是面向家庭作业和例题上。我们已经显著地增大了例题

的数量,这些例题在说明和理解基本概念上是很重要的。我们也增加了家庭作业的习题数量,并将这些习题按它们的难度和复杂程度进行了重新组织,再从中挑选了一部分题给出了答案。供讲授本书用的教师参考手册可从出版商处获得,其中包括了本书全部习题的最新题解;这些题解是由 MIT 的 Li Lee 和 Maya Said 以及 GIT 的 Jordan Rosenthal 和 Greg Slabaugh 准备的。这本手册还包括了我们在 MIT, GIT 和 University of Massachusetts Dartmouth 教这门课时所用的一些考试题。

和早先的教科书一样,本书是假定读者已具备高等微积分的背景,并在复数和复变函数基础方面有较好的掌握。另外,为了使讨论对更为广泛的读者可接受,我们删除了使用复数围线积分。包括拉普拉斯变换和傅里叶变换在内的对连续时间信号的线性系统理论有些了解仍然是一个基本的前提,而这些在大多数电气和机械工程系大学本科的课程安排中都是会有的。有了这些背景之后,这本书就自成体系了;尤其是,不要求预先在离散时间信号、 z 变换、离散傅里叶变换等这些方面的知识。在有些章的稍后部分,会涉及一些像量化噪声这样的内容,这就要求有随机信号方面的基础知识。在第 2 章和附录 A 中都将对此作简单介绍。

在很多信号处理课中要包括一些在计算机上完成的作业已是习以为常的了。本书的很多习题都可以很容易地转变成用计算机来解的练习题。和本书的第 1 版相同,我们都有意地没有给出用以实现本书所述算法的特定软件。这样做有许多理由,其中最主要的是:在众多的个人电脑和工作站上都有可资利用的各种各样廉价的信号处理软件包,可用于演示和实现信号处理。这些软件包都有详细地注释,良好的技术支持以及方便的用户界面,便于学生使用。再者,这些软件本身都处在一个不断完善的过程中,我们极力主张,在课堂上用的软件应该是经过不断考验和更新的版本。现在越来越多的学生都比较早地学习了 MATLAB,我们对这份热情也予以首肯。然而,我们在推崇利用计算工具(如 MATLAB)的强大功能来创建应用本书的理论和基本原理的例题和例证的某一陈述时,不要让编程语法和软件环境的功能分散了应突出的概念和所采用的途径。我们坚信,亲身经历的东西有很大的价值。的确是,像 MATLAB 这样的软件工具能让学生在自己的个人电脑上实现很复杂的信号处理系统,而且我们感到一旦学生在基本理论上是很自信的话会对这种实现有很大的好处;他就能区分出是概念上的错误还是编程上的错误。为此,教师手册中还包括了一节,建议在两本廉价的书中,即《Computer-Based Exercises for Signal Processing Using MATLAB 5》by McClellan, et al., 和《Computer Explorations in Signals and Systems-Using MATLAB》by Buck, Daniel and Singer, 安排这方面的作业。这两本书都能从 Prentice-Hall, Inc. 得到。建议将这些计算机练习书中的作业与在本书中某些特定的节、例题和习题联系起来。这将允许教师来安排计算机作业以便与课堂上所讲的内容和例题联系在一起,并可以将这些计算机作业与常规的书面作业联系起来以增强在题中所表明的基本概念。

本书在材料的组织上为大学本科生和研究生的使用都提供了相当大的灵活性。典型的供大学本科生一学期用的选修课可以覆盖第 2 章 2.0~2.9 节;第 3 章;第 4 章 4.0~4.6 节;第 5 章 5.0~5.3 节;第 6 章 6.0~6.5 节;第 7 章 7.0~7.3 节以及 7.4~7.5 节的简单介绍。如果学生在一般的信号与系统课程中已学过离散时间信号与系统,则可以很快地掠过第 2、第 3 和第 4 章,而留出富裕的时间来学习第 8 章。作为一年级研究生的课程,除了上述内容外,还可以包括第 5 章余下的部分,4.7 节有关多采样率信号处理的讨论,4.8 节有关量化问题的简单介绍,以及或许还可以包括在 4.9 节讨论的有关在 A/D 和 D/A 转换器中噪声形成的介绍。

一年级的研究生课还应该包括在 6.6~6.9 节所讨论的量化问题,7.4 节和 7.5 节最优 FIR 滤波器的讨论,以及第 8 章全部离散傅里叶变换和第 9 章利用 FFT 的离散傅里叶变换的计算等内容。在第 10 章的很多例子能有效地加强对 DFT 的讨论。在两学期的研究生课中,除了应包括本书的全部内容外,还可以包括一些另外的更为先进的一些专题。

第 2 章介绍了离散时间信号与系统的基本类型,并定义了系统的基本性质,诸如线性、时不变性、稳定性和因果性等。本书的主要着眼点是放在线性时不变系统上,这是因为有许多成熟的方法可以用于这类系统的分析与设计。尤其是在这一章中通过卷积和建立了线性时不变系统的时域表示法,并引入了由线性常系数差分方程所描述的一类线性时不变系统。在第 6 章还将对该类系统做更详细地讨论。在第 2 章还通过傅里叶变换引入了信号与系统的频域表示法。第 2 章重点放在利用傅里叶变换来表示序列,也就是把序列表示为一组复指数的线性组合,以及建立傅里叶变换的基本性质上。

在第 3 章,作为傅里叶变换的推广建立了 z 变换。这一章重点放在 z 变换的基本定理和性质上,以及对逆变换运算的部分分式展开法上。第 5 章将广泛深入地讨论如何利用在第 3 章和第 4 章所得到的结果来表示和分析线性时不变系统。

在离散时间信号是通过对连续时间信号周期采样而得到的情况下,第 4 章详细讨论了这两类信号之间的关系,其中包括奈奎斯特采样定理。另外,还讨论了离散时间信号增采样和减采样,这些在多采样率信号处理系统和采样率转换中都会用到。这一章以在从连续时间到离散时间转换中所遇到的某些实际问题的讨论作为结束,其中包括为避免混叠而采用的预滤波,当离散时间信号用数字表示时幅度量化的建模,以及在简化模数(A/D)和数模(D/A)转换过程中利用过采样的问题等。

第 5 章利用在前面各章中建立的概念详细地研究线性时不变系统的各种性质。我们定义了一类理想频率选择性滤波器,并对由线性常系数差分方程所描述的系统建立了系统函数和零极点表示法,而该类系统的实现将在第 6 章详细讨论。同时,在第 5 章还定义并讨论了群延迟、相位响应和相位失真,以及系统的幅度响应和相位响应之间的关系,其中包括对最小相位、全通和广义线性相位系统等的讨论。

第 6 章集中讨论由线性常系数差分方程描述的系统,并用方框图和线性信号流图表示这类系统。本章的大部分内容是建立各种重要的系统结构,并比较它们之间的一些性质。这些讨论和各种滤波器结构的重要性都基于这样一个事实:在离散时间系统的具体实现中,系数的不准确性和运算误差的影响都与所采用的具体结构密切相关。无论在具体实现中所用的技术是数字的还是离散时间模拟的,这些基本问题都是类似的。本章是在数字实现的范畴内,通过对数字滤波器的系数量化和运算舍入噪声影响的讨论来阐明这些问题的。

第 6 章主要关注的是线性常系数差分方程的表示和实现,而第 7 章则讨论为了逼近某一期望的系统响应而获得这类差分方程系数的步骤,其设计方法分为无限脉冲响应(IIR)滤波器设计和有限脉冲响应(FIR)滤波器设计两大类。

在连续时间线性系统理论中,傅里叶变换主要是作为表示信号与系统的一种分析工具。与此对照,在离散时间情况下,很多信号处理系统和算法则涉及到要直接计算傅里叶变换。尽管傅里叶变换本身是不能计算的,但它的采样形式,即离散傅里叶变换(DFT)却是可以计算出来的,并且对有限长信号来说,其 DFT 就是该信号的完全傅里叶表示。第 8 章详细讨论离散傅里叶变换及其性质,以及它与离散时间傅里叶变换的关系。这一章还将介绍离散余弦变换,

这一变换在包括音频和视频压缩的许多应用中正在起着越来越重要的作用。第9章将介绍并讨论许多重要的用于计算或产生离散傅里叶变换的各种算法,其中包括 Goertzel 算法、快速傅里叶变换(FFT)算法,以及线性调频(鸟声)变换算法等。

有了前面这几章,特别是第2,3,5和8章的背景,第10章集中讨论如何利用离散傅里叶变换对信号进行傅里叶分析。如果没有对前面所涉及到的问题,以及对DFT与傅里叶变换之间的关系有一个透彻的理解,那么利用DFT对一个实际信号进行分析时往往会导致混淆和曲解。在第10章将会提到许多这样的问题。关于利用依时傅里叶变换对具有时变特性的信号由进行傅里叶分析的问题也将作适当的讨论。

第11章介绍离散希尔伯特(Hilbert)变换。这种变换出现在各种不同的实际应用中,其中包括逆滤波、实带通信号的复数表示、单边带调制技术以及许多其它的方面。

在这一版中,我们感谢并欢迎 John Buck 教授的加盟。当他在 MIT 还是一名学生以及最近作为 University of Massachusetts Dartmouth 的一名成员时,通过他对这门课的讲授,一直长期对本书作出了贡献。在这一版中,整个的修订工作,家庭作业的重新组织,以及许多例题的补充他都承担着主要的责任。对于本书第2版的问世,他对这项工作所表现出的深刻理解和献身精神是毫无疑问的。

Alan V. Oppenheim
Ronald W. Schaffer

致 谢

在准备这本书的两个版本的过程中,我们一直有幸得到许多同事、学生和朋友的宝贵帮助、建议和支持。多年来,我们的很多同事在 MIT 和 Georgia Tech 与我们一起使用这本教科书进行教学,并从他们的看法和反馈中受益匪浅。这些同事包括 MIT 的 Arthur Baggeroer, Sidney Burrus, Meir Feder, Jae Lim, Bruce Musicus, Hamid Nawab, Gregory Wornell 和 Victor Zue 等教授,以及在 Georgia Tech 的 Tom Barnwell, Mark Clements, Monty Hayes, Jim McClellan, Russ Mersereau, David Schwartz, Mark Smith, Vijay Madisetti, Doug Williams 和 Tong Zhou 等教授。

在我们学术生涯的大部分时间里,MIT 和 Georgia Tech 始终为我们的研究和教学工作提供了一个激励的环境,并对这一任务提供了积极有效的鼓励和支持。另外,RWS 要对 W. Kelley Mosley 的友谊和支持,以及 John and Mary Franklin Foundation 通过 John and Marilu McCarty Chair 多年来所给予的支持表示特别地感谢。AVO 要对 Mr. Ray Stata 和 Analog Devices, Inc., 以及 Ford Foundation 在 MIT 的信号处理领域所给予慷慨而持续地支持表示深深的谢意,其中包括在电气工程方面的 Distinguished Professor Chair 基金项目和在工程方面的 Ford Chair 基金项目。

我们特别感到幸运的是与 Prentice Hall 的共事与合作。我们与 Prentice Hall 的关系已经有了多年的经历,并有多个写作项目。来自 Prentice Hall 的 Eileen Clark, Marcia Horton, Tom Robbins, Amy Rosen 和 Sharyn Vitrano 对当前这一版本所给予的鼓励和支持为我们写出和完成这一任务增加了乐趣。

在第 2 版的出版过程中,非常荣幸地得到很多同事、学生和朋友的帮助,非常感谢他们费去了大量的宝贵时间帮助我们完成这项工作。特别要对如下诸位表示我们的谢意:

MIT 的 Li Lee 和 Maya Said 和 Georgia Tech 的 Jordan Rosenthal 和 Greg Slabaugh 为本书做了习题的题解,University of Massachusetts Dartmouth 的 Hu Dou 为基本题做了答案。

Wade Torres, Akmal Butt 和 Faramarz Fekri 帮助更新了参考文献。

Vivian Berman 帮助设计了新的封面。

Drala Chupp, Stacy Schultz 和 Kay Gilstrap 为这个修订本的准备所给予的帮助,并对我们的教学活动提供持续地支持。

Matthew Secor 和 Giovanni Aliberti 在手稿准备过程中有关很多计算机方面的工作所给予的帮助。

以及以下各位帮助仔细校对了清样:

Susan Alderman

Jon Arrowood

Joe Arrowood

Chalee Asavathiratham

Halük Aydinoglu

Ali Behboodian

Albert Chan
Yonina Eldar
Chris Lanciani
Li Lee
Fernando Mujica
Ara Wefian
Andrew Rusell
Trevor Trinkaus

Matthew Cobb
Christoforos Hadjicostis
Nicholas Laneman
Michael Lopez
Burhan Necioglu
Eric Reed
Mayay Said

例题总汇

- 例 2.1 基本序列的组合
- 例 2.2 周期和非周期离散时间正弦序列
- 例 2.3 理想延迟系统
- 例 2.4 滑动平均
- 例 2.5 一个无记忆系统
- 例 2.6 累加器系统
- 例 2.7 一个非线性系统
- 例 2.8 作为一个时不变系统的累加器
- 例 2.9 压缩器系统
- 例 2.10 前向和后向差分系统
- 例 2.11 稳定或不稳定性测试
- 例 2.12 卷积和的计算
- 例 2.13 卷积和的解析计算
- 例 2.14 累加器的差分方程表示
- 例 2.15 滑动平均系统的差分方程表示
- 例 2.16 差分方程的递推计算
- 例 2.17 理想延迟系统的频率响应
- 例 2.18 LTI 系统的正弦响应
- 例 2.19 理想频率选择性滤波器
- 例 2.20 滑动平均系统的频率响应
- 例 2.21 突然加上一个指数信号的绝对可加性
- 例 2.22 理想低通滤波器的平方可加性
- 例 2.23 常数的傅里叶变换
- 例 2.24 复指数序列的傅里叶变换
- 例 2.25 对称性质的举例说明
- 例 2.26 利用表 2.2 和表 2.3 求傅里叶系数
- 例 2.27 利用表 2.2 和表 2.3 求傅里叶反变换
- 例 2.28 由频率响应求单位脉冲响应
- 例 2.29 由差分方程求单位脉冲响应
- 例 2.30 白噪声
- 例 3.1 右边指数序列
- 例 3.2 左边指数序列

- 例 3.3 两个指数序列的和
- 例 3.4 再论两个指数序列的和
- 例 3.5 双边指数序列
- 例 3.6 有限长序列
- 例 3.7 稳定性、因果性和 ROC
- 例 3.8 二阶 z 变换
- 例 3.9 用部分分式展开法求 z 反变换
- 例 3.10 有限长序列
- 例 3.11 用幂级数展开求反变换
- 例 3.12 用长除法进行幂级数展开
- 例 3.13 左边序列的幂级数展开
- 例 3.14 移位指数序列
- 例 3.15 指数相乘
- 例 3.16 非有理 z 变换的反变换
- 例 3.17 二阶极点
- 例 3.18 时间倒置指数序列
- 例 3.19 用 z 变换求卷积
- 例 4.1 一个正弦信号的采样与重建
- 例 4.2 在欠采样正弦信号重建中的混叠
- 例 4.3 第二个混叠的例子
- 例 4.4 利用离散时间低通滤波器的理想连续时间的低通滤波
- 例 4.5 一个理想连续时间带限微分器的离散时间实现
- 例 4.6 用一个正弦输入为例来说明例 4.5
- 例 4.7 由脉冲响应不变法求得一离散时间低通滤波器
- 例 4.8 脉冲响应不变法应用于具有有理系数函数的连续时间系统
- 例 4.9 非整数延迟
- 例 4.10 具有非整数延迟的滑动平均系统
- 例 4.11 采样率按一非整数有理因子的转换
- 例 4.12 一个正弦信号的量化误差
- 例 5.1 衰减和群延迟的效果
- 例 5.2 二阶系统
- 例 5.3 ROC 的确定
- 例 5.4 一阶系统的逆系统
- 例 5.5 在 ROC 内有一个零点的系统的逆系统
- 例 5.6 一阶 IIR 系统
- 例 5.7 一个简单的 FIT 系统
- 例 5.8 二阶 IIR 系统
- 例 5.9 二阶 FIR 系统
- 例 5.10 三阶 IIR 系统

- 例 5.11 具有相同 $C(z)$ 的系统
- 例 5.12
- 例 5.13 一阶和二阶全通系统
- 例 5.14 最小相位/全通分解
- 例 5.15 FIR 系统的补偿
- 例 5.16 具有线性相位的理想低通滤波器
- 例 5.17 I 类线性相位系统
- 例 5.18 II 类线性相位系统
- 例 5.19 III 类线性相位系统
- 例 5.20 IV 类线性相位系统
- 例 5.21 一个线性相位系统的分解
- 例 6.1 一个差分方程的方框图表示
- 例 6.2 一个 LTI 系统的直接 I 型和直接 II 型实现
- 例 6.3 从一个流图确定系统函数
- 例 6.4 举例说明直接 I 型和直接 II 型结构
- 例 6.5 举例说明级联型结构
- 例 6.6 举例说明并联型结构
- 例 6.7 没有零点的一阶系统的转置型
- 例 6.8 基本二阶节的转置型
- 例 6.9 一阶系统的舍入噪声
- 例 6.10 二阶系统的舍入噪声
- 例 6.11 幅度加权与舍入噪声之间的相互影响
- 例 6.12 对于 6.7.5 节中的 FIR 系统的幅度加权考虑
- 例 6.13 在一阶系统中的极限环现象
- 例 6.14 二阶系统中的溢出振荡
- 例 7.1 离散时间滤波器指标的确定
- 例 7.2 用脉冲响应不变法设计巴特沃兹滤波器
- 例 7.3 用双线性变换法设计巴特沃兹滤波器
- 例 7.4 巴特沃兹逼近
- 例 7.5 切比雪夫逼近
- 例 7.6 椭圆逼近
- 例 7.7 线性相位低通滤波器
- 例 7.8 用 Kaiser 窗法设计低通滤波器
- 例 7.9 用 Kaiser 窗法设计高通滤波器
- 例 7.10 用 Kaiser 窗法设计微分器
- 例 7.11 交错点定理与多项式
- 例 8.1 周期脉冲串的离散傅里叶级数
- 例 8.2 离散傅里叶级数的对偶性
- 例 8.3 周期矩形脉冲串的离散傅里叶级数

- 例 8.4 周期卷积
- 例 8.5 周期脉冲串的傅里叶变换
- 例 8.6 傅里叶级数系数与一个周期的傅里叶变换之间的关系
- 例 8.7 矩形脉冲的 DFT
- 例 8.8 序列的循环移位
- 例 8.9 DFT 的对偶关系
- 例 8.10 与延迟脉冲序列的循环卷积
- 例 8.11 两个矩形脉冲的循环卷积
- 例 8.12 循环卷积作为带有混叠的线性卷积
- 例 8.13 DCT-2 中的能量压缩
- 例 9.1 线性调频变换的参数
- 例 10.1 利用 DFT 作傅里叶分析
- 例 10.2 DFT 值之间的联系
- 例 10.3 加窗对正弦信号傅里叶分析的影响
- 例 10.4 谱采样影响的示例
- 例 10.5 用与 DFT 频率一致的频率进行谱采样
- 例 10.6 加 Kaiser 窗时对正弦信号的 DFT 分析
- 例 10.7 用 32 点 Kaiser 窗和补零时的 DFT 分析
- 例 10.8 对于频率估计的过采样和线性内插
- 例 10.9 线性调频信号的依时傅里叶变换
- 例 10.10 语音信号依时傅里叶变换的谱图表示
- 例 11.1 有限长序列
- 例 11.2 指数序列
- 例 11.3 周期序列
- 例 11.4 用 Kaiser 窗设计希尔伯特变换器
- 例 A.1 理想低通滤波器的噪声功率输出
- 例 A.2 二阶 IIR 滤波器的噪声功率输出

目 录

译者的话

前言

致谢

例题总汇

第 1 章 绪论	(1)
第 2 章 离散时间信号与系统	(7)
2.0 引言	(7)
2.1 离散时间信号:序列	(8)
2.1.1 基本序列和序列运算	(9)
2.2 离散时间系统	(14)
2.2.1 无记忆系统	(15)
2.2.2 线性系统	(15)
2.2.3 时不变系统	(16)
2.2.4 因果性	(17)
2.2.5 稳定性	(18)
2.3 线性时不变系统	(18)
2.4 线性时不变系统的性质	(23)
2.5 线性常系数差分方程	(28)
2.6 离散时间信号与系统的频域表示	(32)
2.6.1 线性时不变系统的特征函数	(32)
2.6.2 突然加上复指数输入	(36)
2.7 用傅里叶变换表示序列	(38)
2.8 傅里叶变换的对称性质	(44)
2.9 傅里叶变换定理	(46)
2.9.1 傅里叶变换的线性	(47)
2.9.2 时移和频移	(47)
2.9.3 时间倒置	(48)
2.9.4 频域微分	(48)
2.9.5 帕斯瓦尔定理	(48)
2.9.6 卷积定理	(48)

2.9.7 调制或加窗定理·····	(49)
2.10 离散时间随机信号·····	(52)
2.11 小结·····	(56)
习题·····	(56)
第3章 z变换 ·····	(77)
3.0 引言·····	(77)
3.1 z变换·····	(85)
3.2 z变换收敛域的性质·····	(85)
3.3 z反变换·····	(91)
3.3.1 观察法·····	(91)
3.3.2 部分分式展开法·····	(91)
3.3.3 幂级数展开法·····	(94)
3.4 z变换的性质·····	(96)
3.4.1 线性·····	(87)
3.4.2 时移·····	(87)
3.4.3 用指数序列相乘·····	(98)
3.4.4 $X(z)$ 的微分·····	(99)
3.4.5 复数序列的共轭·····	(100)
3.4.6 时间倒置·····	(100)
3.4.7 序列卷积·····	(100)
3.4.8 初值定理·····	(101)
3.4.9 若干z变换性质列表·····	(102)
3.5 小结·····	(102)
习题·····	(103)
第4章 连续时间信号的采样 ·····	(113)
4.0 引言·····	(113)
4.1 周期采样·····	(113)
4.2 采样的频域表示·····	(115)
4.3 由样本重构带限信号·····	(120)
4.4 连续时间信号的离散时间处理·····	(123)
4.4.1 线性时不变离散时间系统·····	(125)
4.4.2 脉冲响应不变·····	(129)
4.5 离散时间信号的连续时间处理·····	(131)
4.6 利用离散时间处理改变采样率·····	(135)
4.6.1 采样率按整数因子减小·····	(135)
4.6.2 采样率按整数因子增加·····	(139)
4.6.3 采样率按非整数因子变化·····	(142)