

[美] Sen M. Kuo, Bob H. Lee, Wenshun Tian 著

梁维谦 译



配光盘

实时数字 信号处理： 实践方法与应用

——（第2版）——

 **WILEY**
Publishers Since 1807

清华大学出版社



实时数字 信号处理： 实践方法与应用 (第2版)

[美] Sen M. Kuo, Bob H. Lee, Wenshun Tian 著
梁维谦 译

 **WILEY**
Publishers Since 1807

清华大学出版社
北京

Sen M. Kuo, Bob H. Lee and Wenshun Tian

Real-Time Digital Signal Processing: Implementations and Applications(Second Edition)

ISBN: 0-470-01495-4

Copyright © 2006 by John Wiley & Sons, Inc.

Original language published by John Wiley & Sons, Inc. All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher

Simplified Chinese translation edition is published and distributed exclusively by Tsinghua University Press under the authorization by John Wiley & Sons, Inc., within the territory of the People's Republic of China only(excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan). Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书中文简体字翻译版由美国约翰·威立父子公司授权清华大学出版社在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区)独家出版发行。未经许可之出口视为违反著作权法,将受法律之制裁。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。

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2008-1923

本书封面贴有 John Wiley 激光防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话: 010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

实时数字信号处理: 实践方法与应用: 第2版/(美)郭森林,(美)李迅,(美)田文顺著;梁维谦译.
--北京:清华大学出版社,2012.9

书名原文: Real-Time Digital Signal Processing: Implementations and Applications

ISBN 978-7-302-29715-4

I. ①实… II. ①郭… ②李… ③田… ④梁… III. ①数字信号处理 IV. ①TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 190357 号

责任编辑: 邹开颜

封面设计: 傅瑞学

责任校对: 赵丽敏

责任印制: 李红英

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175 邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈: 010-62772015, zhilian@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者: 清华大学印刷厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185mm×260mm 印 张: 34.75 字 数: 844千字

附光盘 1 张

版 次: 2012 年 9 月第 1 版 印 次: 2012 年 9 月第 1 次印刷

印 数: 1~3000

定 价: 69.00 元

产品编号: 028085-01

译者序

PREFACE

今天,有关数字信号处理的理论、技术和应用蓬勃发展,相关教材、专著和论文层出不穷。这不仅得益于计算机、微处理器、数字信号处理器、可编程逻辑器件和专用集成电路等数字系统的广泛应用,更得益于新需求的不断涌现。数字信号处理教材大体上可分为4大类:基础理论、新方法、应用技术、器件与系统。基础理论方面的,如奥本海姆(Alan V. Oppenheim)、谢弗(Ronald W. Schafer)、巴克(John R. Buck)合著的《离散时间信号处理》(Discrete-Time Signal Processing)。新方法方面的,如Dimitris G. Manolakis、Vinay K. Ingle、Stephen M. Kogon合著的《统计与自适应信号处理》(Statistical and Adaptive Signal Processing)。应用技术方面的,如郭森麒(Sen M. Kuo)、李迅(Bob H. Lee)、田文顺(Wenshun Tian)合著的《实时数字信号处理:实践方法与应用》(Real-Time Digital Signal Processing: Implementations and Applications)。器件与系统方面的,如郭森麒(Sen M. Kuo)、颜允圣(Woon-Seng Gan)合著的《数字信号处理器:体系结构、实现与应用》(Digital Signal Processors: Architectures, Implementations, and Applications)。学者、工程师和学生可以根据自身的学习和工作需要选择使用这些教材。

一个完整的数字信号处理最小系统主要包括:硬件电路板(配套开发工具和交叉编译软件环境)、系统软件(用于系统启动、多任务管理和人机交互等)和(实时)数字信号处理软件。通常的开发过程为:(1)系统功能需求分析;(2)根据系统任务选择DSP或FPGA(field-programmable gate array)芯片和开发板,定制与任务相关的电路板;(3)在计算机上编写和调试系统软件和信号处理软件;(4)交叉编译为目标芯片支持的代码,下载到目标板进行在线调试,为提高运行效率通常采用C和汇编语言混合编程;(5)脱仿真调试,验证后发布。可以看到这一完整过程涉及硬件设计、嵌入式系统开发和数字信号处理算法设计与实现。一个成功的项目需要硬件工程师、嵌入式软件工程师和数字信号处理算法工程师紧密、有效地配合。其中数字信号处理算法工程师负责实现系统功能,是系统的核心。算法工程师的工作是一项有趣而又具有挑战性的工作,他们分析系统功能需求,提出数字信号处理方法,设计高效的实现算法,编写并调试算法程序(对于定点DSP,还需进行程序定点化)。因此他们需要掌握数字信号处理的基本理论,阅读大量文献以精通自身研究领域的信号处理方法,熟悉算法设计方法,熟悉MATLAB、C/C++以及DSP体系结构和汇编语言。前两方面的知识和能力主要来自于对书本的学习和思考,后两方面则更多来自于实践。

在从事信号处理和模式识别的科研和教学工作期间,我经常会受到学生们在信号处理理论与实践方面的脱节。研究生新生们大都害怕或是不愿意接触那些“硬邦邦”的开发板,即使开始动手实验,也容易让一些“莫名其妙”的程序错误打击自信心。同学们一定要重

视实践环节。一个创新的科研成果或产品，不仅要首先想到，还要首先做到。否则，即使有好的想法，也只能看着别人的成果发表，而徒呼奈何。理论和实践在很多时候是相辅相成的反馈过程：提出方法，实验，根据实验结果修正方法（加深对方法的理解），创新。

《实时数字信号处理：实践方法与应用》（第2版）继承了第1版《实时数字信号处理：基于TMS320C55X的实现、应用和实验》（清华大学出版社在2003年引进并出版了该书的影印版）的理论与实践结合的特点，并进一步拓展了应用部分，增加了诸如语音编码、信道编码、音频编码、图像处理、信号发生与检测、回声消除和噪声消除等多章新内容。通过具体应用的实践过程，使读者了解到典型数字信号处理系统的开发全过程，并提供了大量实验题目供读者学习使用。本书的三位作者分别来自于大学和产业公司。他们当中不仅有知名的学者，还有大型企业的技术领袖，有着多年的数字信号处理领域的教学和工作经验。示例方法和算法都经过作者的精心设计，没有过多晦涩难懂的理论推导，换之以物理概念的理解和启发思考的实验题目，深入浅出，易于接受。其中的一些示例程序稍作修改后可直接应用于相应的工程任务中去。

参加《实时数字信号处理：实践方法与应用》（第2版）翻译工作的人员有：梁维谦（第1、2、6、9、13、14章）、易安希（第3章）、翁海波（第4章）、熊良鹏（第5章）、天森（第7章）、宋寅（第8章）、刘建明（第10章）、涂奇雄（第11章）、袁坤（第12章）、王伟（第15章）。梁维谦博士和褚翠莲承担校译和审定工作。

在翻译工程中，我们努力做到“信、达、雅”。但由于译者水平有限，译稿难免存在一些疏误，请读者批评指正。

感谢清华大学电子工程系刘润生教授，他帮助我们处理译稿中的许多的专业词汇难题。感谢清华大学出版社的邹开颜同志，她的热心和努力促使了本书（第2版）中文版的问世。感谢我们的家人和朋友，感谢他们的理解和支持。

梁维谦

2012年8月于清华大学伟清楼

序言

PREFACE

近年来,数字信号处理(DSP)已经扩展到超出滤波器、频域分析及信号生成的范围。越来越多的市场向 DSP 应用打开,之前实时信号处理在这些市场中或者不可行或者过于昂贵。对于实际应用的 DSP 算法,通用数字信号处理器的实时信号处理为其提供了有效的设计与实现方法。然而,在当今的工程领域,这是一个很有挑战性的工作。随着 DSP 渗透到很多实际应用,对高性能数字信号处理器的需求在今年迅速扩展。很多工业公司当前正参与实时 DSP 的研究与开发中。因此,不仅掌握 DSP 理论而且掌握实时信号系统的设计实现技术,对于当今的学生、实践工程师及开发研究人员变得日益重要。

本书介绍了实时 DSP 基础原理,并且使用实际操作的方法介绍了 DSP 算法、系统设计、实时实现考虑以及很多实际应用。本书包含很多有用的实例,如实际操作的实验软件以及使用 MATLAB、Simulink、C 及 DSP 汇编语言的程序。书中也包含用于进一步探索实例和实验的各种练习。本书使用德州仪器的代码集成开发环境和用于实时实验与应用的频谱数字 TMS320VC5510 DSP 启动工具包(DSK)。

本书强调实时 DSP 应用,且可作为高年级大学生/研究生的教材。本书的预修课程为信号与系统概念、微处理器架构与编程以及基本的 C 编程知识。这些专题在初、中级电气和计算机工程、计算机科学以及其他相关课程中均有涉及。本书亦可作为桌面参考书,以供 DSP 工程师、算法开发者及嵌入式系统程序员学习 DSP 概念,开发工作中的实时 DSP 应用。我们使用一种避免很多理论推导的实际方法。在每章结尾均有 DSP 教材列表,提供数学证明。德州仪器(www.ti.com)的 TMS320C55x DSP 处理器和 Math Works(www.mathworks.com)的 MATLAB 与 Simulink 的手册与使用说明同样对学习有帮助。

这是 2001 年出版、名为《实时数字信号处理:实现、应用与 TMS320C55x 实验》一书的第 2 版,作者是 Kuo, Lee, 由 John Wiley & Sons, Ltd 出版。

修订中的主要变化如下:

(1) 使用有效的软件开发过程:从算法设计和利用 MATLAB 与浮点 C 证明开始,到有限字长分析、定点 C 实现和在定点 DSP 处理器上使用内联函数、汇编程序、C 与汇编编程混合的代码优化。这种一步一步的软件开发和开发过程被用在第 8~15 章的有限冲激响应(FIR)滤波、无限冲激响应(IIR)滤波、自适应滤波、快速傅里叶变换和很多实际应用中。

(2) 将第 1 版的第 9 章扩展为 8 章,增加了必要的背景及一些广泛使用的 DSP 应用,如语音编码、信道编码、音频编码、图像处理、信号发生与检测、回声消除和噪声消减等,以实施使用优化的软件开发过程的实验。

(3) 使用最有效的 MATLAB 图形用户接口(GUI)工具开发分析 DSP 算法,如信号处

理工具(SPTTool)、滤波器设计与分析工具(FDATool)等。这些工具对滤波器设计、分析、量化、测试与实现都很有效。

(4) 使用一步一步的实验创建 CCS DSP/BIOS 应用、配置用于实时音频应用的 TMS320VC5510 DSK, 以及利用 MATLAB 的 CCS 特性连接改进 DSP 开发、调试、分析和测试性能。

(5) 更新实验以包含新的实际操作的练习与应用。同时, 使用最新版的软件和用于实时实验的 TMS320C5510 DSK 版更新所有程序。

很多现有的算法和应用, 可用 MATLAB 和浮点 C 程序实现。本书提供了一种系统的软件开发过程, 用于将这些程序转换为定点 C 并进行优化以便在可商用的定点 DSP 处理器上实现。MATLAB 用于分析和滤波器设计, C 程序用于实现 DSP 算法, CCS 被整合到 TMS320C55x 的实验与应用中, 以有效阐述实时 DSP 概念和应用。书中强调了 C 与汇编语言混合编程, 以便为快速软件开发与维护有效利用先进的 DSP 架构。

本书分为两大部分: DSP 实现与 DSP 应用。第一部分, DSP 实现(第 1~7 章)讨论了实时 DSP 原理、架构、算法及实现思考。第 1 章概述了实时 DSP 功能模块的基本原理、DSP 硬件选择、定点与浮点 DSP 设备、实时约束、算法开发、DSP 芯片挑选及软件开发。第 2 章介绍了 TMS320C55x DSP 处理器的架构与汇编编程。第 3 章介绍了基本 DSP 概念和在 DSP 硬件上实现数字滤波器与算法的实际考虑。第 4 章集中研究了 FIR 滤波器的设计、实现和应用。数字 IIR 滤波器和自适应滤波器分别在第 5、第 7 章介绍。FFT 算法的开发、实现和应用在第 6 章介绍。

第二部分, DSP 应用(第 8~15 章)介绍了一些信号处理中的实际应用, 这些应用已经在系统实现中起到了重要作用。这些挑选的 DSP 应用包括第 8 章中的信号(正弦、噪声及多频音)发生、第 9 章中的双音调多频率检测、第 10 章中的自适应回声消除、第 11 章中的语音编码算法、第 12 章中的语音增强技术、第 13 章中的音频编码方法、第 14 章中的错误纠正编码技术和第 15 章中的图像处理原理。

正如任何试图在给定时间捕捉艺术状态的书籍, 本书中自然出现了这个不断变化领域中的快速发展导致的更新。我们确信本书将作为已经产生的知识的引导者和将随之产生的知识的启发者。

软件有效性

本文在实例、实验和应用中使用了各种 MATLAB、浮点与定点 C、DSP 汇编和 C 与汇编混合程序。这些程序及很多其他程序和实际数据文件均可在附带的 CD 中获得。附录 B 有目录结构和子目录名字的解释。这些软件将帮助对 DSP 算法实现的理解, 且需要在每章最后部分的实验中用到。其中的一些实验设计包括经过细微修改过的实例代码。通过检查、学习及修改实例代码, 这些软件也可作为其他实际应用的原型。我们进行了各种尝试以保证代码的正确性。我们也将感谢将任何代码错误告知我们的读者(kuo@ceet.niu.cn), 以便我们可以改正、更新及在网站上公告: <http://www.ceet.niu.edu/faculty/kuo>。

致谢

德州仪器的 Cathy Wicks 和 Gene Frantz 及 Math Works 的 Naomi Fernandes 和

Courtney Esposito 为我们完成本书提供了必需的支持,对此我们表示感谢。我们对支持该工程的 Wiley 的下列人员表示感谢: 执行责任编辑 Simone Taylor, 助理编辑 Emily Bone 和执行工程编辑 Lucy Bryan。我们也感谢为本书作最终准备的 Wiley 员工。最后,我感谢自始至终表现出无尽的爱、鼓励、耐心和理解和家人。

Sen M. Kuo, Bob H. Lee, Wenshun Tian

目录

CONTENTS

1 实时数字信号处理导论	1
1.1 实时 DSP 系统的基本要素	2
1.2 模拟接口	2
1.2.1 采样	3
1.2.2 量化和编码	5
1.2.3 平滑滤波器	7
1.2.4 数据转换器	7
1.3 DSP 硬件	8
1.3.1 DSP 硬件选择	8
1.3.2 DSP 处理器	11
1.3.3 定点与浮点处理器	13
1.3.4 实时约束	14
1.4 DSP 系统设计	14
1.4.1 算法开发	15
1.4.2 DSP 处理器的选择	16
1.4.3 软件开发	17
1.4.4 高级软件开发工具	18
1.5 DSP 开发工具介绍	19
1.5.1 C 编译器	20
1.5.2 汇编器	20
1.5.3 链接器	20
1.5.4 其他开发工具	22
1.6 实验与程序示例	22
1.6.1 使用 CCS 和 DSK 的实验	22
1.6.2 使用 CCS 和 DSK 调试程序	25
1.6.3 使用探点的文件 I/O	28
1.6.4 使用 C 文件系统功能的文件 I/O	31
1.6.5 使用分析器进行代码效率分析	33
1.6.6 使用 DSK 的实时实验	34

1.6.7	采样定理	37
1.6.8	ADC 中的量化	39
	参考文献	39
	练习题	40
2	TMS320C55x 数字信号处理器导论	43
2.1	处理器家族简介	43
2.2	TMS320C55x 体系结构	44
2.2.1	体系结构概述	44
2.2.2	总线	46
2.2.3	片上存储器	46
2.2.4	内存映射寄存器	48
2.2.5	中断和中断向量	50
2.3	TMS320C55x 外围电路	52
2.3.1	外部存储器接口	52
2.3.2	直接存储器存取	53
2.3.3	增强主机接口	54
2.3.4	多通道缓冲器串行口	55
2.3.5	时钟产生器和定时器	57
2.3.6	通用 I/O 口	57
2.4	TMS320C550x 的寻址方式	58
2.4.1	直接寻址方式	59
2.4.2	间接寻址方式	60
2.4.3	绝对寻址方式	61
2.4.4	内存映射寄存器寻址方式	62
2.4.5	寄存器位寻址方式	63
2.4.6	循环寻址方式	63
2.5	流水线和并行处理	64
2.5.1	TMS320C55x 的流水线	64
2.5.2	并行执行	65
2.6	TMS320C55x 指令集	67
2.6.1	算术指令	67
2.6.2	逻辑和位操作指令	68
2.6.3	移动指令	69
2.6.4	程序流程控制指令	69
2.7	TMS320C55x 汇编语言编程	73
2.7.1	汇编伪指令	73
2.7.2	汇编声明语法	75
2.8	TMS320C55x 的 C 语言编程	77

2.8.1	数据类型	77
2.8.2	C 编译器生成的汇编代码	77
2.8.3	编译器关键字和程序伪指令	80
2.9	C 语言和汇编语言混合编程	81
2.10	实验和程序示例	84
2.10.1	C 与汇编代码接口	84
2.10.2	汇编编程的地址模式	85
2.10.3	锁相环和定时器	87
2.10.4	SDRAM 的 EMIF 配置	93
2.10.5	Flash 储存设备编程	95
2.10.6	使用 McBSP	96
2.10.7	AIC23 配置	98
2.10.8	直接内存访问	101
	参考文献	104
	练习题	104
3	DSP 基础及应用要点	108
3.1	数字信号和系统	108
3.1.1	基本的数字信号	108
3.1.2	数字系统的模块化框图表示	109
3.2	系统概念	112
3.2.1	线性时不变系统	112
3.2.2	z 变换	115
3.2.3	传输函数	116
3.2.4	极点与零点	118
3.2.5	频率响应	120
3.2.6	离散傅里叶变换	122
3.3	随机变量简介	124
3.3.1	随机变量概述	124
3.3.2	随机变量的计算	125
3.4	定点化介绍与量化效应	127
3.4.1	定点格式	127
3.4.2	量化误差	129
3.4.3	信号量化	130
3.4.4	系数量化	131
3.4.5	截断噪声	131
3.4.6	定点化工具箱	132
3.5	溢出及解决方法	134
3.5.1	饱和算法	135

3.5.2	溢出处理	135
3.5.3	信号缩放	135
3.5.4	预留位	136
3.6	实验和程序示例	136
3.6.1	正弦信号的量化	136
3.6.2	语音信号量化	138
3.6.3	系数量化	138
3.6.4	溢出与饱和算法	141
3.6.5	函数逼近	143
3.6.6	使用 DSK 产生实时数字信号	151
	参考文献	155
	练习题	156
4	FIR 滤波器的设计与实现	159
4.1	FIR 滤波器的介绍	159
4.1.1	滤波器的特性	159
4.1.2	滤波器类型	160
4.1.3	滤波器特性	162
4.1.4	线性相位 FIR 滤波器	163
4.1.5	FIR 滤波器实现	165
4.2	FIR 滤波器设计	168
4.2.1	傅里叶序列方法	168
4.2.2	吉伯斯现象	169
4.2.3	窗函数	171
4.2.4	用 MATLAB 设计 FIR 滤波器	174
4.2.5	用 FDA 工具设计 FIR 滤波器	176
4.3	执行需要考虑的问题	182
4.3.1	FIR 滤波器的量化效应	182
4.3.2	执行 MATLAB	183
4.3.3	浮点数 C 的执行	184
4.3.4	定点 C 的执行	185
4.4	应用：内插和抽取滤波器	186
4.4.1	内插	186
4.4.2	抽取	188
4.4.3	采样率变换	188
4.4.4	MATLAB 应用	190
4.5	实验和程序示例	191
4.5.1	利用定点 C 的 FIR 滤波器的应用	191
4.5.2	利用 C55x 汇编语言实现 FIR 滤波器	192

4.5.3	优化对称 FIR 滤波器	194
4.5.4	利用双 MAC 结构进行优化	195
4.5.5	抽取的实现	197
4.5.6	内插实现	198
4.5.7	采样率变换	199
4.5.8	用 DSP/BIOS 和 DSK 实现实时采样率变换	200
参考文献	209
练习题	210
5	无限长单位冲激响应(IIR)滤波器的设计和实现	213
5.1	引言	213
5.1.1	模拟系统	213
5.1.2	映射性质	215
5.1.3	模拟滤波器的特性	215
5.1.4	频率转换	217
5.2	IIR 滤波器的设计	217
5.2.1	双线性变换	218
5.2.2	双线性变换设计数字滤波器	219
5.3	IIR 滤波器的实现	220
5.3.1	直接型	220
5.3.2	级联型	221
5.3.3	并联形式	222
5.3.4	用 MATLAB 实现 IIR 滤波器	223
5.4	用 MATLAB 设计 IIR 滤波器	224
5.4.1	用 MATLAB 设计滤波器	224
5.4.2	用 MATLAB 进行频率转换	226
5.4.3	用 Fdatool 设计和实现滤波器	227
5.5	实现考虑	230
5.5.1	稳定性	230
5.5.2	有限精度效应和解决办法	231
5.5.3	MATLAB 实现	232
5.6	实际应用	236
5.6.1	循环振荡器	236
5.6.2	递归正交振荡器	238
5.6.3	参数均衡器	239
5.7	实验和程序示例	240
5.7.1	浮点直接 I 型 IIR 滤波器	240
5.7.2	定点直接 I 型滤波器	241
5.7.3	定点直接 II 型级联 IIR 滤波器	242

5.7.4	用 DSP intrinsics 实现	244
5.7.5	用汇编语言实现	247
5.7.6	用 DSP/BIOS 实时实验	249
5.7.7	参数均衡器的实现	250
5.7.8	用 DSP/BIOS 的实时双带均衡器	251
	参考文献	252
	练习题	253
6	频谱分析和快速傅里叶变换	256
6.1	傅里叶序列和转化	256
6.1.1	傅里叶序列	256
6.1.2	傅里叶变换	257
6.2	离散傅里叶变换	258
6.2.1	离散时间傅里叶变换	258
6.2.2	离散傅里叶变换	259
6.2.3	重要性质	261
6.3	快速傅里叶变换	263
6.3.1	时间抽取	263
6.3.2	频率抽取	265
6.3.3	快速傅里叶逆变换	266
6.4	实现考虑	266
6.4.1	计算问题	266
6.4.2	有限精度效应	267
6.4.3	MATLAB 实现	267
6.4.4	用 MATLAB 实现定点 FFT	268
6.5	实际应用	270
6.5.1	频谱分析	270
6.5.2	频谱泄漏和精度	271
6.5.3	功率谱密度	274
6.5.4	快速卷积	276
6.6	实验和程序实例	278
6.6.1	DFT 的浮点 C 实现	278
6.6.2	DFT 的 C55x 汇编实现	280
6.6.3	FFT 的浮点 C 实现	282
6.6.4	FFT 的 C55x 实现	284
6.6.5	FFT 和 IFFT 的汇编实现	285
6.6.6	快速卷积实现	289
6.6.7	用 DSP/BIOS 实现的实时 FFT	291
6.6.8	实时快速卷积	291

参考文献	293
练习题	294
7 自适应滤波	296
7.1 随机过程简介	296
7.2 自适应滤波器	298
7.2.1 自适应滤波器简介	298
7.2.2 代价函数	299
7.2.3 最陡下降法	301
7.2.4 LMS 算法	302
7.2.5 改进的 LMS 算法	303
7.3 性能分析	304
7.3.1 稳定性约束条件	304
7.3.2 收敛速度	305
7.3.3 额外均方误差	305
7.3.4 归一化 LMS 算法	306
7.4 移植注意事项	306
7.4.1 计算量问题	306
7.4.2 有限字长效应	307
7.4.3 MATLAB 实现	308
7.5 应用	309
7.5.1 自适应系统辨识	309
7.5.2 自适应线性预测	310
7.5.3 自适应噪声消除	312
7.5.4 自适应陷波滤波器	313
7.5.5 自适应信道均衡	314
7.6 实验与程序实例	316
7.6.1 浮点 C 实现	316
7.6.2 泄露 LMS 算法的定点 C 实现	317
7.6.3 归一化 LMS 算法的 ETSI 实现	320
7.6.4 汇编语言实现延时 LMS 算法	321
7.6.5 自适应系统辨识	325
7.6.6 自适应预测和噪声消除	327
7.6.7 自适应信道均衡器	329
7.6.8 基于 DSK 的实时自适应谱线增强器	332
参考文献	333
练习题	333
8 数字信号发生器	336
8.1 正弦波发生器	336

8.1.1	查找表方法	336
8.1.2	线性调频脉冲信号	338
8.2	噪声发生器	339
8.2.1	线性同余序列生成器	339
8.2.2	伪随机二进制序列发生器	341
8.3	实际应用	342
8.3.1	警报发生器	342
8.3.2	高斯白噪声	343
8.3.3	双音多频音频发生器	344
8.3.4	舒适噪声语音通信系统	344
8.4	实验和工程例子	345
8.4.1	使用 C5510 DSK 的正弦波发生器	345
8.4.2	使用 C5510 DSK 的白噪声发生器	346
8.4.3	使用 C5510 DSK 哀号型警报发生器	346
8.4.4	使用 C5510 DSK 的 DTMF 发生器	348
8.4.5	使用 MATLAB 图形用户界面的 DTMF 发生器	349
	参考文献	350
	练习题	351
9	双音多频检测	353
9.1	引言	353
9.2	DTMF 音频检测	354
9.2.1	DTMF 解码指标	354
9.2.2	Goertzel 算法	355
9.2.3	其他 DTMF 检测方法	357
9.2.4	实现考虑	359
9.3	网络应用问题与解决方案	361
9.4	实验与项目举例	362
9.4.1	Goertzel 算法的定点 C 实现	362
9.4.2	Goertzel 算法的 C55x 汇编语言实现	364
9.4.3	利用 C5510 DSK 的 DTMF 检测	365
9.4.4	应用全极点建模进行 DTMF 检测	368
	参考文献	371
	练习题	372
10	自适应回声消除	373
10.1	线路回声简介	373
10.2	自适应回声消除器	374
10.2.1	自适应回声消除的原理	374

10.2.2	性能评价	376
10.3	实际考虑	376
10.3.1	信号预白化	376
10.3.2	延迟检测	377
10.4	双端检测影响与解决方法	379
10.5	非线性处理器	380
10.5.1	中心削波	380
10.5.2	舒适噪声	381
10.6	声学回声消除	381
10.6.1	声学回声	382
10.6.2	声学回声消除器	383
10.6.3	子带实现	383
10.6.4	无延迟结构	385
10.6.5	实现考虑	386
10.6.6	测试标准	386
10.7	实验和程序实例	387
10.7.1	AEC 的 MATLAB 实现	387
10.7.2	浮点 C 声学回声消除	390
10.7.3	C55x Intrinsics 上的声学回声消除器	393
10.7.4	延迟估计实验	395
	参考文献	396
	练习题	397
11	语音编码技术	398
11.1	语音编码介绍	398
11.2	码激励线性预测(CELP)声码器概述	399
11.2.1	合成滤波器	400
11.2.2	长时预测滤波器	403
11.2.3	基于感知的最小过程	403
11.2.4	激励信号	404
11.2.5	代数 CELP	405
11.3	常用 CODEC 概述	405
11.3.1	G.723.1 概述	406
11.3.2	G.729 概述	409
11.3.3	GSM AMR 概述	411
11.4	因特网协议声音运用	412
11.4.1	VoIP 概述	413
11.4.2	实时传输协议和有效负荷类型	415
11.4.3	举例: 包装 G.729	415