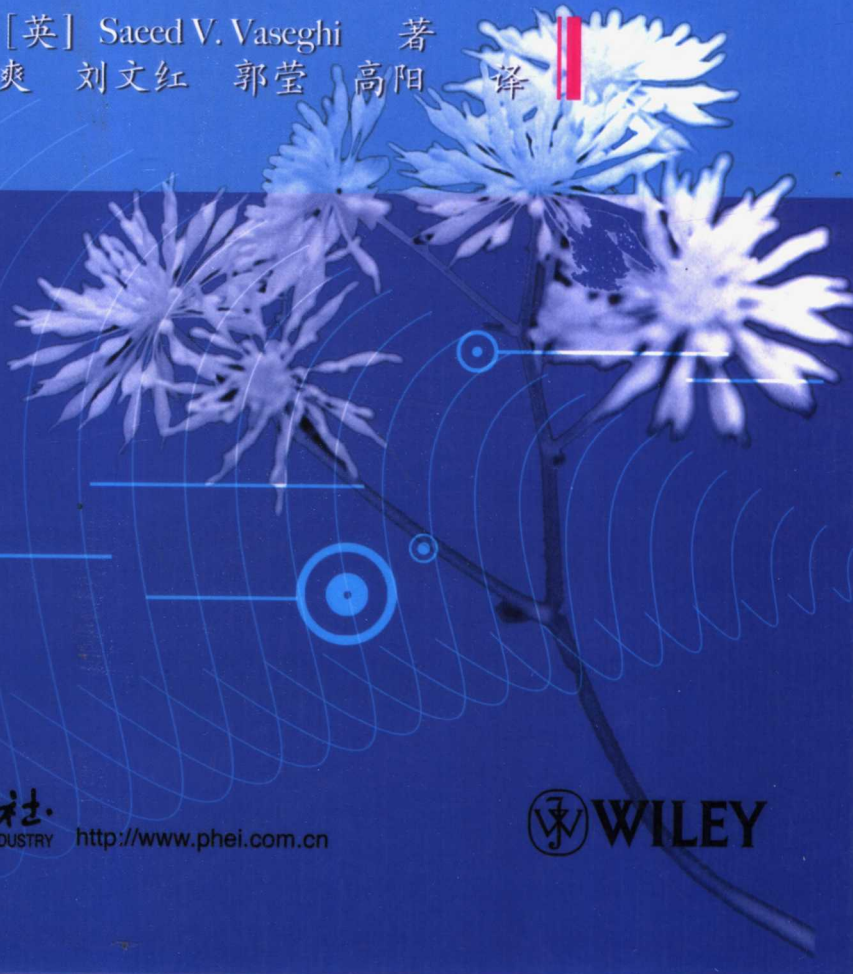
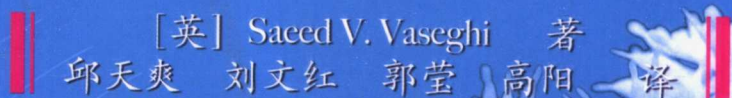


现代通信信号处理丛书

现代数字信号处理 与噪声降低(第3版)

Advanced Digital Signal Processing and
Noise Reduction (Third Edition)

[英] Saeed V. Vaseghi 著
邱天爽 刘文红 郭莹 高阳 译



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>



WILEY

现代数字信号处理与噪声降低(第3版)

现代数字信号处理 与噪声降低(第3版)

Advanced Digital Signal Processing and
Noise Reduction (Third Edition)

John G. Proakis, Dimitris D. Petrocheilos

John G. Proakis, Distinguished Professor Emeritus,
University of California, San Diego

Dimitris D. Petrocheilos, Professor,
University of California, San Diego

John G. Proakis, Distinguished Professor Emeritus,
University of California, San Diego

Dimitris D. Petrocheilos, Professor,
University of California, San Diego

John G. Proakis, Distinguished Professor Emeritus,
University of California, San Diego

Dimitris D. Petrocheilos, Professor,
University of California, San Diego

John G. Proakis, Distinguished Professor Emeritus,
University of California, San Diego

Dimitris D. Petrocheilos, Professor,
University of California, San Diego

John G. Proakis, Distinguished Professor Emeritus,
University of California, San Diego

现代通信信号处理丛书

现代数字信号处理与噪声降低 (第3版)

Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction (Third Edition)

[英] Saeed V. Vaseghi 著
邱天爽 刘文红 郭莹 高阳 译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书以通信和信息处理系统为应用背景,在简要介绍概率论和随机过程基本原理的基础上,详细介绍了贝叶斯估计与分类、隐马尔可夫模型、自适应滤波器、多波段线性预测器和谱估计技术等,深入探讨了关于回波抵消、脉冲噪声和瞬态噪声的消除、宽带噪声抑制、信道估计,以及基于隐马尔可夫模型的信号与噪声分离技术。本书以读者易于接受的图示和数学推导,着重介绍了贝叶斯理论及其在噪声削弱中的应用。全书共分为17章,包括:绪论,噪声与失真,概率与信息论模型,贝叶斯推断,隐马尔可夫模型,最小二乘误差滤波器,自适应滤波器,线性预测模型,功率谱与相关函数,内插,谱幅度估计,脉冲噪声,瞬态噪声脉冲,回波抵消,信道均衡及盲解卷积,噪声中的语音增强,无线通信中的噪声。本书是一本从实际应用中提炼问题,并上升到理论高度进行分析与解决的好书,具有较强的实际应用价值和理论价值,既可以作为研究生和大学本科高年级学生的教学参考书,也可以供通信与电子信息相关领域的工程技术人员参考。

Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction (Third Edition)

Saeed V. Vaseghi

All rights reserved. This translation published under license.

Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Ltd.

本书简体中文版专有翻译版权由John Wiley & Sons, Ltd.授予电子工业出版社。未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字:01-2007-2017

图书在版编目(CIP)数据

现代数字信号处理与噪声降低:第3版/(英)瓦塞(Vaseghi,S.V.)著;邱天爽等译.一北京:电子工业出版社,2007.8

(现代通信信号处理丛书)

书名原文:Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction, 3rd Edition

ISBN 978-7-121-04837-1

I. 现… II. ①瓦…②邱… III. ①数字信号—信号处理②数字信号传输—噪声控制 IV. TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第123145号

责任编辑:王春宁

印 刷:北京市海淀区四季青印刷厂

装 订:涿州市桃园装订有限公司

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

开 本:787×1092 1/16 印张:21.5 字数:547千字

印 次:2007年8月第1次印刷

定 价:39.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

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。

服务热线:(010)88258888。

出版说明

随着通信技术的发展，特别是第三代移动通信技术的发展，宽带无线通信网、高速通信网、新一代信息网技术、光通信技术、个人通信技术和智能信息处理技术等已经进入了一个新的高速发展时期，对各种信号处理技术有了更高的要求。为了适应各种现代通信信息传输网络的技术要求，除了继续采用传统的数字信号处理技术外，还应在此基础上提出新的信号处理技术、算法和模型，以满足应用的需求。

随着通信智能化、大数据量、高速实时的多媒体应用需求的不断增多，处理信号的类型已经不仅仅局限于对常规数据的处理，还要处理大量的语音信号和视频信号等。这类信号的特点是数字化、宽频带、大数据量。信号处理技术在通信工程、电子信息工程、电子信息科学与技术、光信息科学与技术、测控技术与仪器、移动通信、无线通信、卫星通信、光通信、网络通信、智能信息系统以及多媒体通信等领域获得广泛的应用，已经成为应用工程的关键技术之一。而目前，国内市场有关通信应用领域信号处理技术系列化的图书种类还非常匮乏，而市场对这方面的需求量又较大。因此，从这个角度出发，我们依托中国通信学会通信理论与信号处理专业委员会，在专业委员会专家、教授的大力支持下，组织出版一套面向 21 世纪的《现代通信信号处理丛书》。

这套丛书从我国现代通信信号处理技术应用现状与发展情况出发，以应用为中心，全面、系统地介绍了信号处理领域所涉及的有关关键技术与热点技术，如通信中的智能信号处理、通信中的阵列信号处理、通信中的自适应信号处理、通信中的光信号处理、超宽带技术、通信中的信号检测与估值、量子通信中的量子信号处理、网络信号处理和信号处理算法的实时 DSP 实现等内容。虽然所涉及的领域还不够全面，但我们会一直努力。在确保丛书质量的前提下，不断丰富，不断完善，力求内容的先进性、实用性和系统性，突出理论与应用实践的紧密结合，引导读者将信号处理的原理、技术与应用有机地结合，力争为读者奉献一套可读性与可操作性强的系列丛书。

这套丛书将从 2006 年初陆续推出，主要读者对象是广大从事通信信号处理技术工作的科技研发人员和工程技术人员，也适合高等院校相关学科各专业在校师生及刚刚走上工作岗位的毕业生阅读参考。

在编辑出版这套丛书的过程中，得到了中国通信学会通信理论与信号处理专业委员会的大力支持，参与编著和审定的各位专家都为此付出了大量的心血，可以说，没有他们的支持和帮助，就没有这套丛书的出版，对此，我们表示衷心的感谢。希望广大读者对这套丛书提出宝贵意见和建议，以便今后我们加以改进，为广大读者奉献更多、更好的优秀通信类图书。联系信箱：wchn@phei.com.cn。

电子工业出版社
通信分社

译者序

在信息的检测、传输和应用的各个环节，噪声的抑制与消除是一个永恒的话题。围绕着如何抑制、削弱或消除噪声，文献中提出了各种各样的理论和方法，并在实际应用中不断地解决诸如噪声中进行弱信号提取与检测这样的问题。近年来，随着数字蜂窝移动通信技术的广泛普及，噪声抑制问题已经成为通信系统设计的一项重要工作。本书自 1996 年第 1 版问世以来，受到广大读者的广泛关注。在 2000 年出版第 2 版的基础上，2006 年作者又修订出版了第 3 版。

本书以通信和信息处理系统为应用背景，在简要介绍概率论和随机过程基本原理的基础上，详细介绍了贝叶斯估计与分类、隐马尔可夫模型、自适应滤波器、多波段线性预测器和谱估计技术等，深入探讨了关于回波抵消、脉冲噪声和瞬态噪声的消除、宽带噪声抑制、信道估计，以及基于隐马尔可夫模型的信号与噪声分离技术。本书以读者易于接受的图示和数学推导，着重介绍了贝叶斯理论及其在噪声削弱中的应用。

本书的作者萨义德 V. 瓦塞教授是国际数字信号处理领域的知名学者，现为英国 Brunel 大学电子与计算机工程系通信与信号处理领域教授。

本书中译本由大连理工大学电子与信息工程学院邱天爽教授等完成翻译工作。具体分工为：高阳（第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 10 章），邱天爽（第 4 章、第 5 章），刘文红（第 6 章、第 11 章、第 14 章、第 15 章、第 16 章），郭莹（第 7 章、第 8 章、第 9 章、第 12 章、第 13 章、第 17 章）。全书由邱天爽统稿。

译者感谢英文版原书作者萨义德 V. 瓦塞教授和英文版原书出版社 John Wiley and Sons, Inc. 及电子工业出版社对本书翻译工作的支持，感谢大连理工大学电子与信息工程学院对本书翻译工作提供的支持和帮助，感谢大连理工大学电子与信息工程学院部分研究生对本书译文校对所付出的辛勤工作。

由于译者水平所限，加之时间比较仓促，翻译中难免存在不妥和错误之处，恳请读者批评指正。

译者

2007 年 5 月于大连理工大学

前 言

近年来, 数字信号处理 (DSP) 在许多领域得到了极为广泛的应用, 这些领域包括多媒体技术, 语音信号处理, 视频信号处理, 蜂窝移动通信, 自适应网络管理, 雷达系统, 模式分析, 模式识别, 医学信号处理, 金融数据预测, 人工智能, 决策系统, 控制系统和信息搜索引擎等。

信号处理理论与应用涉及对信号过程模式结构的识别、建模和利用等。观测信号通常是失真的或不完整的, 而且受到噪声的干扰。所以, 抑制噪声和去除信道失真干扰是信号处理系统的重要任务之一。

本书自 1996 年第 1 版出版以来, 噪声抑制成为高效自适应移动通信系统和信息处理系统的中心内容。考虑到数字信号处理技术及其应用方面的最新进展, 本书的第 3 版对第 2 版做了广泛修改, 并在几个方面进行了改进, 包括在已有章节的基础上加入新的内容, 并新增了两章内容: 一章是移动噪声环境下的语音增强, 另一章是无线通信系统中噪声及衰落的建模与抑制。

本书的目的是在这 17 章中提供统计信号处理理论与应用及噪声抑制方法一个连贯的、条理清晰的介绍。

第 1 章概述信号处理的基本内容, 并对信号处理的方法和应用进行简要回顾。本章同时还介绍了采样量化的基本原理。

第 2 章介绍了噪声和失真。介绍了包括热噪声、散粒噪声、音频噪声、电磁噪声等几种噪声以及信道失真的基本概念及产生机理。本章同时还介绍了噪声过程的建模方法。

第 3 章介绍了概率模型和随机噪声过程的基本理论和应用。先介绍了随机信号、随机过程、概率模型和统计方法。然后介绍了平稳和非平稳的概念、各态历经过程, 以及几种重要的随机过程, 如高斯过程、混合高斯过程、马尔可夫链和泊松过程等。同时还介绍了传输过程对信号分布情况的影响。

第 4 章是关于贝叶斯估计与分类的介绍。在这一章, 我们把估计问题归纳进贝叶斯推断的框架中, 其中包括了贝叶斯理论、分类估计器、最大似然估计方法、最小估计方差的克拉美罗界、贝叶斯分类、随机过程空间的建模。这一章介绍了大量的关于噪声中观测信号贝叶斯估计的例子。

第 5 章介绍了非平稳信号的隐马尔可夫模型 (HMM)。先介绍了非平稳信号的建模, 之后重点介绍了隐马尔可夫模型的理论和应用。我们将隐马尔可夫模型当做贝叶斯模型考虑, 介绍了训练隐马尔可夫模型的方法, 并利用它做解码和分类。本章同时还讨论了 HMM 在噪声抑制方面的应用。

第 6 章介绍了维纳滤波器。最小均方误差滤波器是通过最小化误差信号空间均方误差函数的估计值而得到的。本章还介绍了维纳滤波器的块信号公式表示及矢量空间解释, 并通过频域的最小均方误差导出维纳滤波器的频率响应。此外, 通过介绍维纳滤波器在去除加性噪声方面及其他方面的应用, 来帮助读者深入理解维纳滤波器的理论。

第 7 章介绍了自适应滤波器。先介绍了卡尔曼滤波器的状态空间方程, 通过更新信号的正交性原理导出最优化系数。然后介绍了递归最小均方滤波器, 它是卡尔曼滤波器采样的自适应实现。同时还介绍了用于实现最优滤波器的最速下降法, 最后讨论了 LMS 自适应滤波器。

第 8 章介绍了线性预测和子带线性预测模型。研究了前向预测、后向预测和格型预测器，并介绍了对于短时和长时相关结构模型进行改进的预测器。同时也介绍了对预测器先验概率密度函数进行估计的预测器模型最大后验 (MAP) 估计。在本章的最后还介绍了线性预测在信号恢复方面的应用。

第 9 章介绍了频率分析和功率谱估计。首先介绍了傅里叶变换的概念与方法及功率谱估计在信号模式和结构识别中的作用。然后主要介绍了非参数谱估计、基于模型的谱估计、最大熵方法和高分辨率谱估计，以及基于奇异值分析的谱分解等。

第 10 章介绍未知采样序列的插值问题。首先介绍了带限信号的理想插值，样本大量丢失的影响及影响插值的因素。同时介绍了多项式插值的一般形式和具体方法 (拉格朗日插值、牛顿插值、Hermite 插值和三次样条插值)。本章还介绍了统计插值方法，包括最大后验插值、基于自回归模型的最小均方误差插值、时频插值和通过搜索自适应码书的内插方法。

第 11 章介绍了功率谱相减。本章给出了谱相减的一般形式，以及处理由谱相减所导致失真的方法。本章还解释了对信号失真进行处理的影响。同时还给出了去除失真的方法和功率谱相减的非线性方法。最后介绍了用于信号恢复的功率谱相减的实现。

第 12、13 章包括了脉冲噪声和暂态噪声脉冲的建模、检测和消除问题。在第 12 章中，脉冲噪声被当做二元状态非平稳过程，并介绍了几种针对脉冲噪声的随机过程模型。为了去除脉冲噪声，本章还介绍了中值滤波器和基于信号过程的线性预测模型。第 13 章的内容紧跟第 12 章，介绍了用于去除暂态噪声的基于模版的方法、基于 HMM 的方法和基于 AR 模型的方法。

第 14 章介绍了回波消除问题。先介绍了电话线路回波的产生、抑制和自适应回波消除问题。之后介绍了声音回波及扬声器和麦克风系统间耦合的问题。最后介绍了子带回波消除系统。

第 15 章包括了盲解卷积和信道均衡。先介绍了信道失真模型和理想信道均衡器。之后介绍了维纳均衡器、利用信道输入功率谱的盲均衡、基于线性预测模型的盲解卷积、贝叶斯信道均衡和对于数字通信系统的盲均衡等。最后介绍了利用高阶统计量的最大相位信道均衡方法。

第 16 章介绍了语音增强的方法。噪声环境下语音增强改进了人类语言通信的质量和可辨识性，并提高了自动语音识别系统的准确性。在许多应用中，如移动电话、免提电话、电话会议系统和车载通信系统，噪声抑制尤为重要。本章给出了噪声中单输入和多输入语音增强的主要方法。

第 17 章介绍了无线通信中的噪声问题。噪声、衰落和有限的无线电带宽是限制无线信道通信容量和速度的主要因素。通信系统的研究发展目标在于提高频谱效率，即一个通信信道中单位带宽下每秒所传输的数据比特数。为了改进效率，现代移动通信系统几乎从信源编码到时间、带宽、空间资源分配等诸方面都依赖于信号处理方法。在这一章中，还介绍了应用信号处理方法来改进通信信号速度和容量的原理和技术。

本书同时在 Web 网站上提供附加资料，教师可以在网站上找到图片的电子版本。请访问 [ftp://ftp.wiley.co.uk/pub/books/vaseghi3e](http://ftp.wiley.co.uk/pub/books/vaseghi3e)。

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 信号与信息	(1)
1.2 信号处理方法	(2)
1.2.1 基于变换的信号处理	(2)
1.2.2 基于模型的信号处理	(3)
1.2.3 贝叶斯统计信号处理	(3)
1.2.4 神经网络	(3)
1.3 数字信号处理的应用	(3)
1.3.1 自适应噪声抵消	(4)
1.3.2 自适应噪声削弱	(5)
1.3.3 盲信道均衡	(5)
1.3.4 信号分类与模式识别	(6)
1.3.5 语音的线性预测建模	(7)
1.3.6 音频信号的数字编码	(7)
1.3.7 噪声中的信号检测	(8)
1.3.8 波形的方向接收: 波束形成	(9)
1.3.9 杜比降噪	(10)
1.3.10 雷达信号处理: 多普勒频移	(11)
1.4 采样与模-数转换	(12)
1.4.1 模拟信号的采样与重建	(13)
1.4.2 量化	(14)
参考文献	(15)
第 2 章 噪声与失真	(17)
2.1 引言	(17)
2.2 白噪声	(18)
2.2.1 带限白噪声	(18)
2.3 有色噪声	(19)
2.4 脉冲噪声	(20)
2.5 暂态噪声脉冲	(21)
2.6 热噪声	(21)
2.7 散粒噪声	(22)
2.8 电磁噪声	(23)
2.9 信道失真	(23)
2.10 回波和多径反射	(24)
2.11 噪声的建模	(24)

2.11.1	加性高斯白噪声模型	(26)
2.11.2	噪声的隐马尔可夫模型	(26)
	参考文献	(27)
第3章	概率与信息论模型	(28)
3.1	引言	(28)
3.2	随机信号	(29)
3.2.1	随机过程	(30)
3.2.2	随机过程空间	(30)
3.3	概率模型	(31)
3.3.1	概率与随机变量	(31)
3.3.2	概率质量函数	(32)
3.3.3	概率密度函数	(33)
3.3.4	随机过程的概率密度函数	(34)
3.4	信息论模型	(35)
3.4.1	熵	(36)
3.4.2	互信息	(38)
3.4.3	熵编码	(40)
3.5	平稳与非平稳随机过程	(41)
3.5.1	严平稳随机过程	(43)
3.5.2	广义平稳随机过程	(43)
3.5.3	非平稳过程	(44)
3.6	随机过程的统计量(期望值)	(44)
3.6.1	均值	(44)
3.6.2	自相关	(45)
3.6.3	自协方差	(46)
3.6.4	功率谱密度	(47)
3.6.5	两个随机过程的联合统计平均	(48)
3.6.6	互功率谱与互协方差	(48)
3.6.7	互功率谱密度与相干性	(49)
3.6.8	各态历经过程与时间平均统计量	(50)
3.6.9	均值各态历经过程	(50)
3.6.10	相关各态历经过程	(51)
3.7	一些有用的随机过程类型	(51)
3.7.1	高斯(正态)过程	(52)
3.7.2	多元高斯过程	(52)
3.7.3	高斯混合过程	(53)
3.7.4	一种二元态高斯过程	(54)
3.7.5	泊松过程	(55)
3.7.6	散粒噪声	(56)
3.7.7	杂波与脉冲噪声的泊松-高斯模型	(57)
3.7.8	马尔可夫过程	(57)

3.7.9	马尔可夫链过程	(58)
3.7.10	伽马概率分布	(59)
3.7.11	瑞利概率分布	(59)
3.7.12	拉普拉斯概率分布	(59)
3.8	随机过程的变换	(60)
3.8.1	随机过程的单调变换	(60)
3.8.2	随机信号的多对一映射	(62)
3.9	小结	(65)
	参考文献	(65)
第4章	贝叶斯推断	(67)
4.1	贝叶斯估计理论: 基本定义	(67)
4.1.1	估计的动态模型和概率模型	(68)
4.1.2	参数空间与信号空间	(69)
4.1.3	参数估计和信号恢复	(69)
4.1.4	性能测度与所希望的估计量性能	(70)
4.1.5	先验、后验空间与分布	(71)
4.2	贝叶斯估计	(74)
4.2.1	最大后验估计	(74)
4.2.2	最大似然估计	(75)
4.2.3	最小均方误差估计	(77)
4.2.4	最小平均绝对误差估计	(78)
4.2.5	均匀分布参数高斯过程条件下 MAP, ML, MMSE 和 MAVE 的等价性	(78)
4.2.6	先验概率对估计偏差和方差的影响	(79)
4.2.7	先验知识和观测数据的相对重要性	(82)
4.3	期望-最大方法	(83)
4.3.1	EM 算法的收敛性	(84)
4.4	最小估计方差的克拉美罗 (CRAMER-RAO) 界	(85)
4.4.1	随机参数的克拉美罗界	(86)
4.4.2	矢量参数的克拉美罗界	(87)
4.5	高斯混合模型的设计	(87)
4.5.1	高斯混合模型的 EM 估计	(88)
4.6	贝叶斯分类	(89)
4.6.1	贝叶斯分类	(90)
4.6.2	分类误差	(92)
4.6.3	离散参数的贝叶斯分类	(92)
4.6.4	最大后验分类	(92)
4.6.5	最大似然分类	(93)
4.6.6	最小均方误差分类	(93)
4.6.7	有限状态过程的贝叶斯分类	(93)
4.6.8	最可能状态序列的贝叶斯估计	(94)
4.7	随机过程空间的建模	(95)

4.7.1	随机过程的矢量量化	(95)
4.7.2	使用高斯模型的矢量量化	(96)
4.7.3	矢量量化器的设计: K-均值聚类	(96)
4.8	小结	(97)
	参考文献	(97)
第 5 章	隐马尔可夫模型	(99)
5.1	非平稳过程的统计模型	(99)
5.2	隐马尔可夫模型	(100)
5.2.1	马尔可夫模型与隐马尔可夫模型比较	(100)
5.2.2	语音隐马尔可夫模型的物理解释	(102)
5.2.3	作为贝叶斯模型的隐马尔可夫模型	(102)
5.2.4	隐马尔可夫模型的参数	(103)
5.2.5	状态观测概率模型	(103)
5.2.6	状态转移概率	(104)
5.2.7	状态-时间网格图	(105)
5.3	隐马尔可夫模型的训练	(105)
5.3.1	前向-后向概率计算	(106)
5.3.2	Baum-Welch 模型的再估计	(107)
5.3.3	离散密度观测模型 HMM 的训练	(108)
5.3.4	连续密度观测模型的 HMM	(109)
5.3.5	高斯混合 PDF 的 HMM	(109)
5.4	利用隐马尔可夫模型译码	(110)
5.4.1	Viterbi 译码算法	(111)
5.5	DNA 与蛋白质序列建模中的 HMM	(112)
5.6	HMM 用于语音与噪声建模	(113)
5.6.1	用 HMM 对语音建模	(113)
5.6.2	基于 HMM 的信号噪声估计	(113)
5.6.3	信号噪声模型的组合与分解	(115)
5.6.4	隐马尔可夫模型组合	(115)
5.6.5	信号噪声状态序列的分解	(116)
5.6.6	基于 HMM 的维纳滤波器	(116)
5.6.7	噪声特性建模	(117)
5.7	小结	(118)
	参考文献	(118)
第 6 章	最小二乘误差滤波器	(120)
6.1	最小二乘误差估计: 维纳滤波器	(120)
6.2	维纳滤波器的块数据公式表示	(123)
6.2.1	最小二乘误差方程的 QR 分解	(124)
6.3	维纳滤波器作为矢量空间投影的解释	(125)
6.4	最小均方误差信号的分析	(126)

6.5	频域维纳滤波器的公式表示	(127)
6.6	维纳滤波器的应用	(128)
6.6.1	维纳滤波器对加性噪声的削弱	(128)
6.6.2	维纳滤波器及信号与噪声的分离	(130)
6.6.3	平方根维纳滤波器	(130)
6.6.4	维纳信道均衡	(131)
6.6.5	多通道 / 多传感器系统中的信号时间校准	(131)
6.7	维纳滤波器的实现	(132)
6.7.1	维纳滤波器阶数的选择	(133)
6.7.2	维纳滤波器的改进	(134)
6.8	小结	(134)
	参考文献	(134)
第 7 章	自适应滤波器	(135)
7.1	引言	(135)
7.2	状态空间卡尔曼滤波器	(135)
7.2.1	卡尔曼滤波器的算法推导	(137)
7.3	样本自适应滤波器	(140)
7.4	递归最小二乘自适应滤波器	(141)
7.4.1	矩阵求逆引理	(142)
7.4.2	滤波器系数的递归时间更新	(143)
7.5	最速下降法	(143)
7.5.1	收敛速度	(145)
7.5.2	自适应步长矢量	(146)
7.6	LMS 滤波器	(146)
7.6.1	泄漏 LMS 算法	(146)
7.6.2	归一化 LMS 算法	(147)
7.7	小结	(148)
	参考文献	(148)
第 8 章	线性预测模型	(150)
8.1	线性预测编码	(150)
8.1.1	LP 模型的频率响应	(152)
8.1.2	预测器系数的计算	(153)
8.1.3	LP 模型解的相关函数估计效应	(154)
8.1.4	逆滤波器: 谱白化	(154)
8.1.5	预测误差信号	(155)
8.2	前向、后向格型预测器	(157)
8.2.1	前向、后向预测器的扩展方程	(158)
8.2.2	Levinson-Durbin 递推解	(158)
8.2.3	格型预测器	(160)
8.2.4	最小二乘预测的另一种公式表示	(160)

8.2.5 预测器模型阶数的选择	(161)
8.3 短时与长时预测器	(162)
8.4 预测器参数的 MAP 估计	(164)
8.4.1 预测器输出概率密度函数	(164)
8.4.2 使用先验 pdf 的预测器系数	(165)
8.5 共振峰跟踪的 LP 模型	(165)
8.6 子带线性预测模型	(166)
8.7 使用线性预测模型的信号恢复	(167)
8.7.1 使用预测模型的频域信号恢复	(169)
8.7.2 子带线性预测维纳滤波器的实现	(170)
8.8 小结	(171)
参考文献	(171)
第 9 章 功率谱与相关函数	(173)
9.1 功率谱与相关	(173)
9.2 周期信号的傅里叶级数表示	(174)
9.3 非周期信号的傅里叶变换表示	(175)
9.3.1 离散傅里叶变换 (DFT)	(176)
9.3.2 时间 / 频率分辨, 不确定性原理	(177)
9.3.3 能量谱密度与功率谱密度	(177)
9.4 功率谱的非参数估计	(178)
9.4.1 周期图的均值与方差	(179)
9.4.2 平均周期图法 (Bartlett 法)	(179)
9.4.3 Welch 法: 由重叠和加窗的数据段求平均周期图	(180)
9.4.4 Blackman-Tukey 法	(181)
9.4.5 由重叠子段的自相关函数得到的功率谱估计	(181)
9.5 基于模型的功率谱估计	(182)
9.5.1 最大熵谱估计	(182)
9.5.2 自回归功率谱估计	(184)
9.5.3 滑动平均功率谱估计	(184)
9.5.4 自回归滑动平均功率谱估计	(184)
9.6 基于子空间特征分解的高分辨率谱估计	(185)
9.6.1 Pisarenko 谐波分解	(185)
9.6.2 多重信号分类 (MUSIC) 谱估计	(187)
9.6.3 基于旋转不变技术 (ESPRIT) 的信号参数估计	(189)
9.7 小结	(190)
参考文献	(190)
第 10 章 内插	(192)
10.1 概述	(192)
10.1.1 采样信号的内插	(192)
10.1.2 因子 I 的数字内插	(193)

10.1.3	丢失样本序列的内插	(195)
10.1.4	影响内插精度的因素	(196)
10.2	多项式内插	(197)
10.2.1	拉格朗日多项式内插	(197)
10.2.2	牛顿多项式内插	(198)
10.2.3	Hermite 多项式内插	(200)
10.2.4	三次样条插值	(200)
10.3	基于模型的内插	(202)
10.3.1	最大后验内插	(202)
10.3.2	最小二乘误差自回归内插	(203)
10.3.3	基于短时预测模型的内插	(203)
10.3.4	基于长时和短时相关的内插	(206)
10.3.5	LSAR 内插误差	(208)
10.3.6	时 / 频域内插	(209)
10.3.7	自适应码书内插	(210)
10.3.8	经由信号替换的内插	(211)
10.4	小结	(211)
	参考文献	(212)
第 11 章	谱幅度估计	(214)
11.1	概述	(214)
11.1.1	带噪信号的谱表示	(215)
11.1.2	带噪信号谱的矢量表示	(215)
11.2	谱相减	(216)
11.2.1	功率谱相减	(217)
11.2.2	幅度谱相减	(218)
11.2.3	谱相减滤波器: 与维纳滤波器的关系	(218)
11.2.4	失真处理	(219)
11.2.5	谱相减对信号失真的影响	(219)
11.2.6	减小噪声方差	(220)
11.2.7	滤除因处理引起的失真	(220)
11.2.8	非线性谱相减	(221)
11.2.9	谱相减的实现	(222)
11.3	贝叶斯 MMSE 谱幅度估计	(224)
11.4	在语音恢复和识别中的应用	(225)
11.5	小结	(226)
	参考文献	(227)
第 12 章	脉冲噪声	(228)
12.1	脉冲噪声	(228)
12.1.1	脉冲噪声的自相关和功率谱	(230)
12.2	脉冲噪声的统计模型	(230)

12.2.1	脉冲噪声的贝努利—高斯模型	(231)
12.2.2	脉冲噪声的泊松—高斯模型	(231)
12.2.3	脉冲噪声的二进制模型	(232)
12.2.4	信干噪比	(232)
12.3	中值滤波器	(233)
12.4	使用线性预测模型消除脉冲噪声	(234)
12.4.1	脉冲噪声检测	(234)
12.4.2	噪声检测能力改进分析	(235)
12.4.3	脉冲噪声检测的双边预测器	(236)
12.4.4	丢弃样本的内插	(237)
12.5	韧性参数估计	(237)
12.6	留声机音频数据的恢复	(238)
12.7	小结	(239)
	参考文献	(239)
第 13 章	暂态噪声脉冲	(241)
13.1	暂态噪声波形	(241)
13.2	暂态噪声脉冲模型	(242)
13.2.1	噪声脉冲模板	(242)
13.2.2	暂态噪声脉冲的自回归模型	(243)
13.2.3	噪声脉冲过程的隐马尔可夫模型	(244)
13.3	噪声脉冲的检测	(244)
13.3.1	噪声脉冲检测的匹配滤波器	(245)
13.3.2	基于逆滤波的噪声检测	(246)
13.3.3	基于 HMM 的噪声检测	(246)
13.4	脉冲噪声失真的消除	(246)
13.4.1	噪声脉冲的自适应相减	(246)
13.4.2	基于 AR 模型的信号失真恢复	(248)
13.5	小结	(249)
	参考文献	(249)
第 14 章	回波抵消	(250)
14.1	概述: 声回波与混合回波	(250)
14.2	电话线混合回波	(251)
14.2.1	回波: 电话网中延迟时间的来源	(252)
14.2.2	回波返回损失	(252)
14.3	混合回波抑制	(253)
14.4	自适应回波抵消	(253)
14.4.1	回波抵消器的自适应算法	(255)
14.4.2	线路回波抵消器的收敛特性	(255)
14.4.3	数字数据传输的回波抵消	(256)
14.5	声回波	(256)

14.6	子带声回波抵消	(259)
14.7	多输入 / 多输出回波抵消	(260)
14.7.1	立体声回波抵消系统	(260)
14.8	小结	(262)
	参考文献	(263)
第 15 章	信道均衡及盲解卷积	(264)
15.1	概述	(264)
15.1.1	理想的信道逆滤波	(265)
15.1.2	均衡误差, 卷积噪声	(265)
15.1.3	盲均衡	(266)
15.1.4	最小和最大相位信道	(267)
15.1.5	维纳均衡器	(268)
15.2	基于信道输入功率谱的盲解卷积	(269)
15.2.1	同态均衡	(270)
15.2.2	使用高通滤波器的同态均衡	(271)
15.3	基于线性预测模型的盲均衡	(271)
15.3.1	通过模型分解的盲均衡	(272)
15.4	贝叶斯盲解卷积与盲均衡	(273)
15.4.1	条件均值信道估计	(274)
15.4.2	最大似然信道估计	(274)
15.4.3	最大后验信道估计	(274)
15.4.4	基于隐马尔可夫模型的信道均衡	(275)
15.4.5	基于 HMM 的最大后验信道估计	(276)
15.4.6	基于 HMM 解卷积的实现	(277)
15.5	数字通信信道的盲均衡	(279)
15.5.1	LMS 盲均衡	(280)
15.5.2	二进制数字信道的均衡	(282)
15.6	基于高阶统计量的盲均衡	(283)
15.6.1	高阶矩、高阶累积量和高阶谱	(283)
15.6.2	线性时不变系统的高阶谱	(285)
15.6.3	基于高阶倒谱的盲均衡	(285)
15.7	小结	(288)
	参考文献	(289)
第 16 章	噪声中的语音增强	(290)
16.1	概述	(290)
16.2	单输入语音增强方法	(291)
16.2.1	语音增强系统概述	(291)
16.2.2	维纳滤波器去噪声	(293)
16.2.3	噪声谱相减	(295)
16.2.4	贝叶斯 MMSE 语音增强	(296)