

国外电子与通信教材系列

统计与自适应 信号处理

Statistical and Adaptive Signal Processing

Dimitris G. Manolakis

[美] Vinay k. Ingle 著

Stephen M. Kogon

周正 等译

顾仲梅 审校

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

统计与自适应信号处理

Statistical and Adaptive Signal Processing

Dimitris G. Manolakis

[美] Vinay k. Ingle 著

Stephen M. Kogon

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书对统计与自适应信号处理的理论方法、实现及应用给出了较完整的论述和介绍。作者根据其多年的教学经验,并针对现代信号处理的理论及应用方面的重要性,选定谱估计、信号建模、自适应滤波与阵列信号处理等几个关键论题进行了详细的讨论。本书强调基本概念和理论方法,目的是为读者以后深入研究一些信号处理的新课题打下良好的基础。为了便于掌握,书中的数学描述和推导仅限于高年级本科生、研究生和工程技术人员能够理解的水平,因此本书具有较强的实用性。

本书适用于大学高年级本科生和研究生作为选修现代信号处理课程的教学参考书,也可作为工程技术人员自修现代信号处理理论及应用的参考书。

Dimitris G. Manolakis et.al: Statistical and Adaptive Signal Processing.

ISBN 0-07-116660-2

Copyright © 2000 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 © 2003.

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:01-2002-1335

图书在版编目(CIP)数据

统计与自适应信号处理/(美)马诺莱克思(Manolakis D.G.)等著;周正等译.-北京:电子工业出版社,2002.5
(国外电子与通信教材系列)

书名原文:Statistical and Adaptive Signal Processing

ISBN 7-5053-7648-9

I. 统... II. ①马... ②周... III. ①统计信号-信号处理-教材... ②自适应通信系统-信号处理-教材
IV. TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第027405号

责任编辑:赵红燕

印刷者:北京天宇星印刷厂

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

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:48 字数:1228千字

版 次:2003年5月第1版 2003年5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

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。

吴佑寿

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单位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 and 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谨与准确。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
杨千里 | 北京邮电大学校长、教授、博士生导师
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委员会委员 |
| | 徐安士 | 北京大学教授、博士生导师、电子学系副主任
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委员会委员 |
| | 阮秋琦 | 北方交通大学教授、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、电子工程系主任
教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导委员会委员 |
| | 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、教材建设委员会主任 |
| | 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 | 电子工业出版社副社长 |

译者序

自 20 世纪 50 年代以来,现代随机信号处理有了很大的发展,其主要成就包括卡尔曼滤波理论、非参量信号检测与估计理论、多维信号处理、自适应滤波理论等。近年来,随着现代通信、信息理论和计算机科学与技术的飞速发展,信号处理的经典理论也在向现代信号处理理论演化,已从研究简单的线性时不变的最小相位系统,发展为研究非线性时变的非最小相位系统。同时由于高阶统计量及小波变换等数学工具的新发展,使人们可以有效地分析和处理非高斯信号和非平稳时变的信号,这就使得现代信号处理成为现代通信信息系统、电子科学技术以及自动控制等众多学科的理论基础和有力工具。随机信号处理与自适应信号处理是现代信号处理的重要理论基础和有效方法之一。

本书是国外最新出版的一本统计信号处理教材,主要适用于大学高年级本科生和研究生作为选修现代信号处理课程的教学参考书,也可作为工程技术人员自学现代信号处理的理论及应用的参考书。本书的主要特点是对统计与自适应信号处理的理论方法、实现及应用给出了较完整的论述和介绍。作者根据其多年的教学经验,并针对现代信号处理的理论及应用方面的重要性,选定谱估计、信号建模、自适应滤波与阵列信号处理等几个关键问题进行了详细的讨论。本书强调基本概念和理论方法,目的是为读者以后深入研究一些信号处理的新课题打下良好的基础。为了便于掌握,书中的数学描述和推导仅限于高年级本科生和研究生能够理解的水平,同时对于学过数字信号处理、概率论和线性代数的工程技术人员也是完全可以理解的。因此本书具有较强的实用性。

为了使学生较全面地掌握有关现代信号处理的理论基础和分析方法的基础知识,并且通过跟踪本学科的最新发展趋势与热门研究课题,培养学生具备适应未来新的交叉学科发展的综合创新能力,我们组织翻译了这本教材,以供有关人士参考。由于涉及较多新的专业词汇及新的概念,书中一定存在有不妥之处,恳请读者指正。

参加本书翻译工作的有研究生陈静、胡雁江、赵立昕、覃波、杨程、周冰普、程辉、杨世民、孟颖、王建权、张溟、黄伦等,另外,北京邮电大学的汤程程、刘娜、韩大江、刘剑等也为本书的翻译做了贡献。全书由顾仲梅博士审校,由周正统一定稿。

前 言

本书的目的是要对统计与自适应信号处理方法的理论、实现及应用提供一个完整的介绍,并根据其理论价值与实际意义,选择如下一些关键技术加以着重讨论:谱估计、信号建模、自适应滤波和阵列信号处理。本书主要是为学生及其指导教师所写,其首要目标是介绍一些基本概念和方法学,以便为今后深入学习、研究及解决新的应用问题打下良好的基础。为此,本书所强调的都是我们认为最基本、并有着诸多重要应用的命题。

本书所用的方法及预备知识

本书旨在帮助在校学生及实践工程师理解算法工作的基本数学原理,了解其固有的局限性,并为其实际的实现提供详细的论述。作者的长期教学实践影响着本书的学术风格,作者本身在学术和工业方面的研究与开发背景,形成了本书的联系实际的特色。全书的数学论述保持在高年级本科生、研究生以及具有数字信号处理、概率论与线性代数基础知识的工程师所能理解的水平。

本书的结构

第 1 章介绍了统计与自适应信号处理的基本概念与应用,并给出了本书的概述。第 2 章和第 3 章回顾了离散时间信号处理的基础知识;研究了频域和时域的随机矢量及序列,并介绍了估计理论的基本概念。第 4 章给出了时域和频域中参数线性信号建模的方法(包括确定的和随机的模型)。第 5 章给出了相关函数及谱密度估计的一些常用方法。第 6 章在假定有关信号可以作为具有已知统计特性的随机过程建模的情况下,对最佳滤波器的理论特性进行了详细的研究。第 7 章包括用于最佳滤波、信号建模及预测的算法和结构。第 8 章介绍了最小二乘估计的原理及其在设计实用滤波器和预测器中的应用。第 9 章到第 11 章采用第 4 章、第 6 章和第 7 章的理论结果以及第 8 章的实用方法,导出、评估并应用了关于信号建模、自适应滤波及阵列处理的一些实用方法。最后,第 12 章介绍了一些高级的课题:高阶矩的定义与性质、盲解卷积和均衡、具有长期记忆的分数和分形信号建模等。附录 A 包括对矩阵求逆的引理。附录 B 回顾了复数空间的最优化。附录 C 是全书所用的 MATLAB 函数的列表。附录 D 回顾了矩阵代数的一些有用结果。附录 E 给出了关于多项式最小相位条件的证明。

本书的使用

本书可以作为电气工程研究生一学期或两学期的课程教材来使用。关于统计与自适应信号处理,两学期的课程可以覆盖本书的大多数内容。典型的一学期的课程小结于下表:

课程	章节
离散时间随机信号与统计信号处理	阅读第1章~第3章及4.1~4.4节与6.1~6.6节
谱估计与信号建模	阅读第1章~第5章、6.1~6.5节、7.4~7.5节、8.1~8.9节、第9章,以及12.1节和12.5~12.6节
自适应滤波	阅读第1章~第3章、第6章~第8章和第10章,以及12.1~12.4节
矩阵处理简介	阅读第3章、6.1~6.5节、2.2节、5.1节、11.1~11.4节、第8章,以及9.5、9.6、11.5、11.6、11.7节

理论与实际

作者认为坚实的理论基础与实际的实现及现实问题的应用应当齐头并进,相得益彰。因此本书列举了大量的计算机实验,用以说明一些重要的概念,同时能帮助读者实现各种算法。书中的每一章还给出了一些例子、习题以及计算机实验,从而可增进对内容的理解。此外,为了有助于读者理解各种算法的理论基础及其局限性,我们针对书中所有主要的算法和说明其应用的例子,都给出了MATLAB函数。有关本书的MATLAB文件及其他材料可参见如下网址:
<http://www.mhhe.com/catalogs/0070400512.mhtml>。采用本书作为课堂教学的指导教师还可以找到书中所有习题的详细解题参考。

反馈意见

虽然作者自知本书尚需不断完善,但是我们相信本书是朝着统计与自适应信号处理领域的介绍性教材的目标迈出的一大步。然而,作为工程师,作者也了解没有最好,只有不断改进才能达到更好。所以,我们欢迎来自教师、学生以及使用本书自学的工程师们的反馈意见,请发电子邮件到 vingle@lynx.neu.edu。

Dimitris G. Manolakis
 Vinay K. Ingle
 Stephen M. Kogon

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 随机信号	1
1.2 谱估计	7
1.3 信号建模	10
1.3.1 有理式或极点-零点模型	11
1.3.2 分数极点-零点模型和分形模型	13
1.4 自适应滤波	15
1.4.1 自适应滤波器的应用	15
1.4.2 自适应滤波器的特点	21
1.5 阵列处理	22
1.5.1 空间滤波或波束形成	22
1.5.2 降低雷达系统中的自适应干扰	24
1.5.3 自适应旁瓣抵消器	25
1.6 本书的结构	26
第 2 章 离散时间信号处理基础	29
2.1 离散时间信号	29
2.1.1 连续时间信号、离散时间信号和数字信号	29
2.1.2 信号的数学描述	30
2.1.3 真实世界的信号	31
2.2 确定性信号的变换域表示法	32
2.2.1 傅里叶变换和傅里叶级数	32
2.2.2 连续时间信号的采样	35
2.2.3 离散傅里叶变换	37
2.2.4 z 变换	38
2.2.5 窄带信号的表示	39
2.3 离散时间系统	41
2.3.1 线性时不变系统的分析	42
2.3.2 对周期性输入的响应	46
2.3.3 相关分析和谱密度	47
2.4 最小相位和系统的可逆性	49
2.4.1 最小相位系统和系统的可逆性	49
2.4.2 全通系统	50
2.4.3 最小相位和全通分解	52
2.4.4 谱因式分解	56

2.5	格型滤波器实现	59
2.5.1	全零点格型结构	59
2.5.2	全极点格型结构	63
2.6	小结	64
2.7	习题	65
第3章	随机变量、矢量和序列	69
3.1	随机变量	69
3.1.1	分布函数与密度函数	70
3.1.2	统计平均值	71
3.1.3	一些有用的随机变量	74
3.2	随机矢量	76
3.2.1	定义和二阶矩	76
3.2.2	随机矢量的线性变换	80
3.2.3	正态随机矢量	81
3.2.4	独立的随机变量的和	83
3.3	离散时间的随机过程	90
3.3.1	用概率函数来描述	92
3.3.2	二阶统计描述	92
3.3.3	平稳性	94
3.3.4	各态遍历	98
3.3.5	随机信号的易变性	100
3.3.6	平稳过程的频域描述	101
3.4	具有平稳随机输入的线性系统	107
3.4.1	时域分析	107
3.4.2	频域分析	110
3.4.3	随机信号的记忆性	111
3.4.4	常见的相关矩阵	112
3.4.5	随机过程的相关矩阵	116
3.5	随机矢量的更新表示	117
3.5.1	用特征根分解进行变换	118
3.5.2	运用三角分解的变换	120
3.5.3	离散的 Karhunen-Loève 变换(DKLT)	122
3.6	估计理论原理	126
3.6.1	估计子的性质	126
3.6.2	均值的估计	129
3.6.3	方差估计	131
3.7	小结	134
3.8	习题	135

第 4 章 线性信号模型	141
4.1 引言	141
4.1.1 线性无参数信号模型	142
4.1.2 有参极点 - 零点信号模型	145
4.1.3 混合过程和 Wold 分解	147
4.2 全极点模型	148
4.2.1 模型性质	148
4.2.2 全极点建模和线性预测	154
4.2.3 自回归模型	155
4.2.4 低阶模型	155
4.3 全零点模型	163
4.3.1 模型性质	163
4.3.2 滑动平均模型	164
4.3.3 低阶模型	164
4.4 极点 - 零点模型	167
4.4.1 模型性质	167
4.4.2 自回归滑动平均模型	169
4.4.3 一阶的极点 - 零点模型: PZ(1,1)	170
4.4.4 总结和对偶性	172
4.5 极点在单位圆上的模型	172
4.6 极点 - 零点模型的复倒谱	175
4.6.1 极点 - 零点模型	175
4.6.2 全极点模型	176
4.6.3 全零点模型	178
4.7 小结	179
4.8 习题	179
第 5 章 非参数功率谱估计	184
5.1 确定信号的谱分析	184
5.1.1 信号采样的影响	186
5.1.2 加窗、周期延拓和外推	186
5.1.3 谱采样的影响	187
5.1.4 窗口效应: 谱泄漏和分辨率损失	191
5.1.5 小结	196
5.2 平稳随机信号的自相关估计	197
5.3 平稳随机信号的功率谱估计	199
5.3.1 利用周期图估计功率谱	200
5.3.2 平滑单一周期图的功率谱估计——Blackman-Tukey 法	209
5.3.3 对多个周期图求平均的功率谱估计——Welch-Bartlett 法	214
5.3.4 一些实际的考虑和例子	218

5.4 联合信号的分析	223
5.4.1 互功率谱的估计	224
5.4.2 频率响应函数的估计	226
5.5 多重锥化截取功率谱估计	230
5.5.1 自功率谱的估计	231
5.5.2 互功率谱的估计	236
5.6 小结	238
5.7 习题	239
第6章 最佳线性滤波器	246
6.1 最佳信号估计	246
6.2 线性均方误差估计	249
6.2.1 误差性能表面	249
6.2.2 线性 MMSE 估计器的推导	253
6.2.3 最佳线性估计器的主元分析	254
6.2.4 几何解释和正交原理	256
6.2.5 小结	257
6.3 正规方程组的解	258
6.4 最佳有限脉冲响应滤波器	262
6.4.1 设计和性质	263
6.4.2 平稳过程的最佳 FIR 滤波器	264
6.4.3 频域解释	268
6.5 线性预测	270
6.5.1 线性信号估计	270
6.5.2 前向线性预测	272
6.5.3 后向线性预测	272
6.5.4 平稳过程	273
6.5.5 性质	276
6.6 最佳无限脉冲响应滤波器	278
6.6.1 非因果 IIR 滤波器	279
6.6.2 因果 IIR 滤波器	279
6.6.3 加性噪声的过滤	282
6.6.4 利用无限过去的线性预测——白化	287
6.7 逆滤波和解卷积	289
6.8 数据传输系统的信道均衡	293
6.8.1 零 ISI 的奈奎斯特判据	294
6.8.2 等价的离散时间信道模型	296
6.8.3 线性均衡器	297
6.8.4 迫零均衡器	298
6.8.5 最小 MSE 均衡器	299

6.9	匹配滤波器和本征滤波器	301
6.9.1	噪声中的确定性信号	302
6.9.2	噪声中的随机信号	304
6.10	小结	308
6.11	习题	308
第7章	最佳线性滤波器的算法和结构	315
7.1	阶数递归算法的基础	315
7.1.1	矩阵分块和最佳嵌套	316
7.1.2	分块厄米特矩阵的逆	317
7.1.3	最佳估计的 Levinson 递归	319
7.1.4	LDL ^H 分解的阶数递归计算	321
7.1.5	最佳估计的阶数递归计算	322
7.2	算法量的解释	324
7.2.1	新息和后向预测	324
7.2.2	部分相关	325
7.2.3	最佳估计的阶数分解	326
7.2.4	Gram-Schmidt 正交化	327
7.3	最佳 FIR 滤波器的阶数递归算法	328
7.3.1	最佳滤波器的阶数递归计算	329
7.3.2	格型 - 梯型结构	332
7.3.3	平稳随机过程的简化	333
7.3.4	基于 UDU ^H 分解的算法	334
7.4	Levinson 和 Levinson-Durbin 算法	335
7.5	最佳 FIR 滤波器和预测器的格型结构	342
7.5.1	格型 - 梯型结构	342
7.5.2	一些性质和说明	345
7.5.3	参数转化	346
7.6	Schür 算法	349
7.6.1	直接 Schür 算法	349
7.6.2	实现上的考虑	351
7.6.3	逆 Schür 算法	355
7.7	Toeplitz 矩阵的三角化和求逆	356
7.7.1	逆 Toeplitz 矩阵的 LDL ^H 分解	356
7.7.2	Toeplitz 矩阵的 LDL ^H 分解	357
7.7.3	实 Toeplitz 矩阵的逆	358
7.8	卡尔曼滤波器算法	360
7.8.1	预先推导	360
7.8.2	卡尔曼滤波器的推导	362
7.9	小结	369

7.10 习题	370
第8章 最小二乘滤波和预测	376
8.1 最小二乘原理	376
8.2 线性最小二乘误差估计	377
8.2.1 正规方程组的导出	379
8.2.2 最小二乘估计的统计性质	384
8.3 最小二乘 FIR 滤波器	387
8.4 线性最小二乘信号估计	392
8.4.1 信号估计和线性预测	392
8.4.2 复合的前向和后向线性预测(FBLP)	394
8.4.3 窄带干扰消除	395
8.5 用正规方程进行 LS 计算	397
8.5.1 线性 LSE 估计	397
8.5.2 LSE FIR 滤波和预测	401
8.6 使用正交化技术的 LS 计算	402
8.6.1 Householder 反射	406
8.6.2 Givens 旋转	408
8.6.3 Gram-Schmidt 正交化	410
8.7 采用奇异值分解的 LS 计算	412
8.7.1 奇异值分解	413
8.7.2 LS 问题的解	416
8.7.3 非满秩的 LS 问题	419
8.8 小结	420
8.9 习题	420
第9章 信号建模和参量谱估计	426
9.1 建模过程:理论和实际	426
9.2 全极点模型的估计	430
9.2.1 直接型结构	430
9.2.2 格型结构	438
9.2.3 最大熵方法	440
9.2.4 线性谱激励	441
9.3 极点-零点模型的估计	441
9.3.1 已知激励	442
9.3.2 未知激励	442
9.3.3 非线性最小二乘最优化	443
9.4 应用	446
9.4.1 谱估计	446
9.4.2 语音建模	449

9.5	最小方差谱估计	451
9.6	谐波模型和频率估计技术	456
9.6.1	谐波模型	457
9.6.2	Pisarenko 谐波分解	460
9.6.3	MUSIC 算法	461
9.6.4	最小范数方法	463
9.6.5	ESPRIT 算法	465
9.7	小结	471
9.8	习题	471
第 10 章	自适应滤波器	476
10.1	自适应滤波器的典型应用	476
10.1.1	通信中的回波抵消	476
10.1.2	数据通信信道的均衡	478
10.1.3	线性预测编码	479
10.1.4	噪声抵消	481
10.2	自适应滤波器的原理	482
10.2.1	自适应滤波器的特征	482
10.2.2	最佳滤波器与自适应滤波器的比较	483
10.2.3	自适应滤波器的稳定性和稳态性能	487
10.2.4	几个实际因素	490
10.3	最速下降法	491
10.4	最小均方自适应滤波器	499
10.4.1	推导	499
10.4.2	平稳 SOE 中的自适应	501
10.4.3	总结和设计准则	507
10.4.4	LMS 算法的应用	510
10.4.5	实际中需要考虑的事项	519
10.5	递归最小二乘自适应滤波器	521
10.5.1	LS 自适应滤波器	521
10.5.2	常规的递归最小二乘算法	525
10.5.3	实际中需要考虑的事项	526
10.5.4	收敛性和性能分析	528
10.6	阵列处理的 RLS 算法	532
10.6.1	使用 Cholesky 和 QR 分解的 LS 计算	532
10.6.2	两个有用的引理	535
10.6.3	QR-RLS 算法	536
10.6.4	扩展的 QR-RLS 算法	537
10.6.5	逆 QR-RLS 算法	538
10.6.6	运用 Givens 旋转的 QR-RLS 算法的实现	538

10.6.7	使用 Givens 旋转的逆 QR-RLS 算法的实现	541
10.6.8	用于阵列处理的 RLS 算法的分类	543
10.7	用于 FIR 滤波的快速 RLS 算法	545
10.7.1	快速固定阶数 RLS FIR 滤波器	546
10.7.2	RLS 格型 - 梯型滤波器	551
10.7.3	使用误差反馈更新的 RLS 格型 - 梯型滤波器	554
10.7.4	基于 Givens 旋转的 LS 格型 - 梯型算法	556
10.7.5	用于 FIR 滤波的 RLS 算法的分类	560
10.8	自适应算法的跟踪性能	561
10.8.1	用于非平稳 SOE 的方法	561
10.8.2	性能分析的预备知识	564
10.8.3	LMS 算法	567
10.8.4	具有指数遗忘的 RLS 算法	572
10.8.5	跟踪性能的比较	577
10.9	小结	577
10.10	习题	578
第 11 章	阵列处理	591
11.1	阵列的基本原理	591
11.1.1	空间信号	592
11.1.2	调制 - 解调	595
11.1.3	阵列信号模型	596
11.1.4	传感器阵列:空间采样	598
11.2	常用的空间滤波:波束形成	600
11.2.1	空间匹配滤波器	603
11.2.2	锥化截取波束形成	607
11.3	最佳阵列处理	610
11.3.1	最佳波束形成	611
11.3.2	最佳波束形成器的特征根分析	615
11.3.3	干扰消除性能	616
11.3.4	锥化截取最佳波束形成	616
11.3.5	广义的旁瓣消除器	618
11.4	最佳波束形成器的性能考虑	620
11.4.1	信号失配的影响	620
11.4.2	带宽的影响	623
11.5	自适应波束形成	626
11.5.1	采样矩阵求逆	627
11.5.2	用 SMI 波束形成器的对角线加载	632
11.5.3	SMI 波束形成器的实现	634
11.5.4	逐点采样自适应方法	636