

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

西蒙·赫金

# 自适应滤波器原理 (第四版)

Adaptive Filter Theory  
Fourth Edition

[美] Simon Haykin 著  
郑宝玉 等译

PEARSON  
Prentice  
Hall



电子工业出版社  
Publishing House of Electronics Industry  
<http://www.phei.com.cn>

作  
者  
力  
作  
者  
力  
作  
者  
力

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

# 自适应滤波器原理

(第四版)

Adaptive Filter Theory

Fourth Edition

[美] Simon Haykin 著

郑宝玉 等译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书是自适应信号处理领域的一本经典教材。全书共17章,系统全面、深入浅出地讲述了自适应信号处理的基本理论与方法,充分反映了近年来该领域的新理论、新技术和新应用。内容包括:自适应LMS横向滤波器、自适应格型滤波器、自适应递归滤波器、频域和子带自适应滤波器、盲自适应滤波器、神经网络非线性自适应滤波器等及其在通信与信息系统中的应用。全书取材新颖、内容丰富、概念清晰、阐述明了,适合于通信与电子信息类相关专业的高年级本科生、研究生、教师及工程技术人员阅读。

Simplified Chinese edition Copyright © 2003 by PEARSON EDUCATION ASIA LIMITED and Publishing House of Electronics Industry.

Adaptive Filter Theory, Fourth Edition, ISBN: 0130901261 by Simon Haykin. Copyright © 2002.

All Rights Reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall.

This edition is authorized for sale only in the People's Republic of China (excluding the Special Administrative Region of Hong Kong and Macau).

本书中文简体字翻译版由电子工业出版社和Pearson Education培生教育出版亚洲有限公司合作出版。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Pearson Education培生教育出版集团激光防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号:图字:01-2002-0000

### 图书在版编目(CIP)数据

自适应滤波器原理(第四版)/(美)赫金(Haykin, S.)著;郑宝玉等译. -北京:电子工业出版社, 2003.7  
(国外电子与通信教材系列)

书名原文: Adaptive Filter Theory, Fourth Edition

ISBN 7-5053-7632-2

I. 自... II. ①赫... ②郑... III. 跟踪滤波器-滤波理论-教材 IV. TN713

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第054074号

责任编辑:史平

印刷者:北京天竺颖华印刷厂

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:47 字数:1203千字

版 次:2003年7月第1版 2003年7月第1次印刷

定 价:69.00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部门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工作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”。

为做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格与准确。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,我们通过与作者联络、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 | 北京邮电大学校长、教授、博士生导师  |
|     | 杨千里 | 总参通信部副部长、中国电子学会会士、副理事长<br>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<br>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<br>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<br>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<br>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<br>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<br>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<br>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<br>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<br>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<br>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<br>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   |

## 关于《自适应滤波器原理》一书



自适应信号处理是信号与信息处理学科一个新的重要学科分支。自适应滤波理论和技术是统计信号处理的重要组成部分。它可以在无需先验知识的条件下,通过自学习适应或跟踪外部环境的非平稳随机变化,并最终逼近维纳滤波器和卡尔曼滤波器的最优滤波性能。因此,自适应滤波器成功地应用于通信、控制、雷达、声纳、地震和生物医学工程等领域。本书系统全面地介绍了这方面的基本理论和应用技术,充分反映了该领域的最新成果,取材新颖、内容丰富、概念清楚、论述严谨,是自适应信号处理领域一部紧跟时代的佳作。本书在章节内容安排方面也颇有特色:在对自适应滤波器做综述性预览之后,按照数学基础、线性滤波、非线性滤波三大部分和横向、格型、脉动阵列三种结构进行深入讨论,并以自适应均衡器和自适应波束形成作为典型应用示例,比较了自适应滤波器的不同算法和不同结构的性能,最后以对新技术进行展望的“后记”作为结束。本书的内容要点如下:

- 随机信号处理的数学基础:随机过程与模型。
- 自适应滤波器基础:维纳最优滤波和线性预测理论。
- 最小均方(LMS)自适应滤波器:包括从最速下降算法到LMS算法,从LMS自适应滤波器到归一化LMS滤波器,从横向结构到格型结构;还包括频域和子带自适应滤波器。
- 递归最小二乘(RLS)自适应滤波器:以卡尔曼滤波理论为主线,贯穿从最小二乘法到RLS自适应滤波再到平方根最小二乘滤波,从横向结构到脉动阵列再到格型结构等内容。
- 自适应无限脉冲响应滤波器:输出误差法和方程误差法自适应滤波器以及结合有限脉冲响应(FIR)结构和无限脉冲响应(IIR)结构期望特性的Laguerre自适应滤波器。
- 有限精度效应。
- 时变系统跟踪。
- 基于盲反卷积的盲自适应滤波器。
- 基于反向传播算法的神经网络非线性自适应滤波器。

本书面向本领域的高年级本科生和研究生系统讲解自适应滤波器理论,也为相关领域的工程技术人员提供了利用该理论解决实际问题的有效方法。因此,本书很适合于通信与电子信息类相关专业的高年级本科生、研究生、教师及工程技术人员阅读。

南京邮电学院教授  
南京邮电学院副院长 **郑宝玉**

中国通信学会通信理论与信号处理专业委员会主任委员

## 译 者 序

随着信号处理学科领域理论与技术的不断进步,自适应信号处理已成为信号与信息处理学科一个新的重要学科分支,并在诸如通信、雷达、声纳、工业控制、地震勘探及生物医学工程等领域获得越来越广泛的应用,与之相关的研究文献及论著也不断问世。由国际著名学者西蒙·赫金(Simon Haykin)教授所著、并为我国广大读者所熟悉的《自适应滤波器原理》一书,堪称反映自适应信号处理当今水平的一部佳作。

该书自第一版 1986 年问世以来,短短十余年时间,已出四版。从第一版仅仅涉及常规自适应滤波,到第二版引入盲自适应方法,再到第三版引入神经网络自适应滤波,直到第四版的进一步修订,始终贯穿着一条基本脉络:体系愈加合理,日臻完善;内容紧跟时代,不断更新。正因为这样,该书倍受读者欢迎,影响与日俱增,赢得很高的声誉。相信该书第四版及其中译本的出版,必将对目前我国高校相关课程体系和内容改革起到一定的借鉴作用。

该书第四版除保持原书构思新颖、取材得当、论述严谨、条理清楚等特色外,在某些方面又有所加强,但其涉及的主要内容和该书的适用范围没有大的变化。根据译者近 10 来使用该书所积累的经验,再结合第四版翻译过程的体会来看,新版本至少有以下几个特点:

- 完善体系结构,强化数学基础。
- 新颖性、系统性与实用性的紧密结合。
- 突出通信信号处理应用。

本书由郑宝玉教授主持翻译,并负责全书统稿和审校。在本书翻译过程中,得到多方面的支持和帮助。除主持者外,为本书提供初稿和作出贡献的还有:张继东、倪梁方、张玲华、侯晓赞、潘磊、王进、沈海红、杨力波等研究生。电子工业出版社的各级领导和编辑为本书的出版付出了辛勤的劳动,借此机会,表示诚挚的谢意。由于全书篇幅太大,时间仓促,加之译者水平有限,错误和不妥之处在所难免,恳望读者批评指正。



# 序 言

自适应滤波器是统计信号处理的一个重要组成部分。凡是需要处理未知统计环境下运算结果所产生的信号或需要处理非平稳信号时,自适应滤波器可提供一种十分吸引人的解决方法,而且其性能通常远优于用常规方法设计的固定滤波器。此外,自适应滤波器还能提供非自适应方法所不可能提供的新的信号处理能力。因此,自适应滤波器成功地应用于诸如通信、控制、雷达、声纳、地震和生物医学工程等诸多领域。

## 本书目的

本书基本目的是研究各种线性自适应滤波器的数学原理。自适应功能根据输入数据调整滤波器中自由参数(系数)来实现,从而使得自适应滤波器实际上是非线性的。我们说自适应滤波器是线性的,指的是如下含义:无论何时滤波器的输入-输出映射都遵循叠加原理,并且在任一特定时刻滤波器的参数都是固定的。

对线性自适应滤波问题,并不存在惟一的解;但存在由各种递归算法所表示的一套工具,每一工具给出它所拥有的期望特性。本书提供了这样一套工具,并且对作为非线性自适应滤波基础的人工神经网络做了介绍。

关于背景部分,假设读者已学过概率论、数字信号处理等大学本科的导论性课程以及通信和控制系统等先修课程。

## 本书组织

本书绪论部分从一般性地讨论自适应滤波器的运算及其不同形式开始,并以其发展历史的注释作为结束。其目的是想通过该课题的丰富历史,向那些对该领域感兴趣并有志潜心钻研的读者追溯这些研究动机的由来。该部分引入的概念和算法将在本书后续章节中详细阐述。

本书主要章节共 17 章,具体安排如下:

- **随机过程与模型** 这方面的内容在第 1 章中介绍,着重讲解平稳随机过程的部分特征(如二阶统计描述)。它是本书其余部分内容的主要基础。
- **维纳(Wiener)滤波器理论及其在线性预测中的应用** 维纳滤波器在第 2 章中介绍,它定义了平稳环境下的最优线性滤波器,因此提供了学习研究自适应滤波器的基础。第 3 章讲述了线性预测理论,着重讨论了前向预测和后向预测及其变种,并以线性预测在语音编码中的应用作为该章的结束。
- **最小均方(LMS, least-mean-square)族自适应滤波器** LMS 滤波器是以横向(即抽头延迟线)结构为基础构建的。其最基本的形式设计简单,性能也高度有效。这两个特性使得 LMS 滤波器在各种应用中非常流行。第 4 章介绍了一种古老的最优化技术——最速下

降法的基础,据此导出 LMS 滤波器。第 5 章详细论述了 LMS 滤波器理论和应用的方方面面,其要点如下:

- (i) 小步长统计理论。它较好地描述了步长参数取很小值时 LMS 滤波器的过渡特性及其学习曲线。这个新理论(来源于非平衡热力学中的 Langevin 方程)避免了 LMS 滤波器研究中传统上采用的独立性理论(independence theory)所做的不切实际的假设。计算机模拟证明了小步长理论的结果与实验结果之间的紧密一致。
- (ii)  $H^\infty$  理论。它提供了 LMS 滤波器的确定鲁棒性(deterministic robustness)的数学基础。

第 6 章和第 7 章扩展了 LMS 滤波器的 LMS 族。这一点是通过详细论述归一化 LMS 滤波器、仿射投影自适应滤波器、频域和子带自适应滤波器来实现的;其中,仿射投影滤波器是介于归一化 LMS 滤波器与递归最小二乘滤波器之间的滤波器。

- 递归最小二乘(RLS, recursive least-squares)自适应滤波器 RLS 滤波器由于可提供快收敛速率而且对输入信号相关矩阵特征值扩散度变化不敏感,从而克服了 LMS 族的某些实际限制;其代价是增加了计算的复杂性。第 8 章讨论了最小二乘法,它可看做源于随机过程的维纳滤波器的确定性复本。在最小二乘法中,输入数据以块接块为基础进行处理。目前,其数值计算复杂性过去不被重视的分块方法正日益引起人们的关注,这应该归功于数字计算机技术的不断进步。第 9 章介绍如何构造最小二乘法,并运用矩阵求逆引理导出 RLS 滤波器。该章的要点是:

- (i) RLS 滤波器的统计理论。
- (ii) RLS 滤波器的  $H^\infty$  理论。

实际上,RLS 自适应滤波器是著名的突出状态概念的卡尔曼(Kalman)滤波器的一个特例。因此,很好地理解卡尔曼滤波器理论(也包括将平稳环境下维纳滤波器作为其特例)是十分重要的。第 10 章讨论了卡尔曼滤波器的推导、它的变种和推广。该章也确立了卡尔曼滤波器与 RLS 滤波器之间的一一对应关系,从而提供了整族 RLS 滤波器统一论述的框架。第 11 章以 Givens 旋转为基础,推导平方根 RLS 滤波器的平方根信息和协方差形式,从而克服了原 RLS 滤波器数字实现中所遇到的数值困难。第 12 章以阶递归滤波器为基础,阐述了自适应滤波器设计中类似于格型的结构。这种滤波器具有类似于 LMS 滤波器的计算复杂性,其复杂性改进通过利用瞬态处理所固有的时移特性获得。第 12 章还介绍了梯度自适应格型(GAL, gradient adaptive lattice)算法和基于 QR 分解的最小二乘格型(QRD-LSL, QR-decomposition-based least-squares lattice)算法的推导,它们分别是计算方面最简单和性能方面最强有力的算法。

- 有限精度效应 贯穿第 5 章到第 12 章的自适应滤波器理论以无限精度运算为基础。然而,当用数字形式实现自适应滤波器时,将产生由有限精度运算引起的有限精度效应。第 13 章讨论了 LMS 和 RLS 滤波器数字实现时的有限精度效应。
- 时变系统跟踪 第 14 章通过计算和比较运行在非平稳环境[假设为马尔可夫(Markov)模型]下的 LMS 和 RLS 滤波器的性能,扩展了这两种滤波器理论。在该章中运用广义卡尔曼滤波器导出修正型 RLS 滤波器,其最优性在非平稳环境下超过 LMS 滤波器。这一章在导出具有自适应记忆(用来递归调整 LMS 滤波器的步长参数和 RLS 滤波器的指

数加权因子)的新型 LMS 和 RLS 滤波器后结束。

- 无限脉冲响应自适应滤波器 第 5 章到第 14 章讨论的线性自适应滤波器都是由有限脉冲响应表征的横向结构或格型结构滤波器。第 15 章主要介绍设计无限脉冲响应 (IIR, Infinite-duration impulse response) 自适应滤波器的输出误差法和方程误差法, 而且讨论了在它们的应用中可能发生的实际问题。该章还叙述了结合 FIR 和 IIR 结构期望特性的 Laguerre 自适应滤波器。
- 盲反卷积 第 5 章至第 15 章研究的线性自适应滤波器都假设可得到期望响应, 该响应在训练时用来引导滤波器自由参数的自适应。当得不到期望响应时, 必须求助于使用盲自适应 (即无监督自适应滤波) 技术。第 16 章讨论了两种基本的盲反卷积算法:
  - 基于二阶统计的子空间分解算法, 它利用了通信信道上包含数据传输的应用中调制信号的循环平稳特性。
  - Bussgang 算法, 它利用了通信信道输出端接收信号的高阶统计特性。
  - Bussgang 分数间隔均衡器的讨论作为这一章的结束, 在该均衡器中盲反卷积的两个主要课题被结合在一起。
- 反向传播学习 由非线性处理单元构建的神经网络为解决各种非线性自适应滤波难题提供了强有力的工具。具有一个或多个隐处理单元层的多层感知器组成一类重要的神经网络。第 17 章导出了多层感知器监督学习的反向传播算法, 该算法可看做 LMS 算法的一种推广。该章所介绍内容的新颖性在于突出反向传播算法的复数形式, 它与本书的余下部分相一致。

本书以后记作为结束。后记主要讨论了如下五个专题:

- 均衡的自适应
- 鲁棒性统计
- 盲信源分离
- 动态驱动的递归神经网络
- 无偏状态估计和非线性动态系统

包括这些内容是为了把自适应滤波器这一主题的一个更加完整的蓝图提供给读者。

本书还包括如下附录:

- 复变函数论
- 对向量微分
- 拉格朗日 (Lagrange) 乘子法
- 估计理论
- 特征分析
- 旋转与反射
- 复数维萨特 (Wishart) 分布

在本书的不同部分, 其应用由在这些章节中介绍的基本思想组成。

## 辅助材料

- 本书还包括一个术语表:由一系列定义、记号、规定、缩写和书中涉及的主要符号组成。
- 本书参考的所有出版物汇编在“参考文献”中。每篇参考文献包括作者姓名和出版年份。为完整起见,还列出大量其他补充参考资料。

## 例题、习题与计算机实验

本书的各个章节包括大量例题,用来说明新讨论的概念和原理。

本书还包括许多计算机实验。开发这些实验的目的是为了更好地说明 LMS 算法和 RLS 算法的基础理论与应用。这些实验可帮助读者比较两种线性自适应滤波算法族的性能。

本书每一章(除了绪论外)以习题作为结束。这出于两点考虑:

- 帮助读者更深地理解该章所包含的内容。
- 鞭策读者拓展该章中讨论的原理和方法。

## 解题指南

本书还附有对第 1 章至第 17 章所有习题进行详细解答的解题指南。采用本书作为教材使用的教师,可直接向出版商索取该指南的副本(见本书末的“教学支持说明”页——编者注)。

所有计算机实验的 MATLAB 代码,可在网站 <http://www.prenhall.com/haykin/> 上获得。

## 使用说明

本书是按自适应信号处理研究生课程的水平编写的。在这个范围内,本书材料的组织为读者选择适合这一主题的兴趣内容提供了很大的灵活性。

我们希望本书对产业界的研究者和工程师以及工作在与自适应滤波器理论和应用有关的政府行政机关的人员也是有用的。

# 目 录

背景与预览	1
<b>第 1 章 随机过程与模型</b>	<b>25</b>
1.1 离散时间随机过程的部分特性	25
1.2 平均各态历经定理	26
1.3 相关矩阵	28
1.4 正弦波加噪声的相关矩阵	31
1.5 随机模型	33
1.6 Wold 分解	37
1.7 回归过程的渐近平稳	38
1.8 尤尔-沃克方程	40
1.9 计算机实验:二阶自回归过程	41
1.10 选择模型的阶数	47
1.11 复值高斯过程	49
1.12 功率谱密度	50
1.13 功率谱密度的性质	52
1.14 平稳过程通过线性滤波器传输	53
1.15 平稳过程的 Cramér 谱表示	56
1.16 功率谱估计	57
1.17 随机过程的其他统计特征	60
1.18 多谱	60
1.19 谱相关密度	63
1.20 本章小结	64
1.21 习题	66
<b>第 2 章 维纳滤波器</b>	<b>70</b>
2.1 线性最优滤波:问题综述	70
2.2 正交性原理	71
2.3 最小均方误差	75
2.4 维纳-霍夫方程	76
2.5 误差性能曲面	78
2.6 多重线性回归模型	81
2.7 示例	83
2.8 线性约束最小方差滤波器	87
2.9 广义旁瓣消除器	90



2.10	本章小结 .....	96
2.11	习题 .....	97
<b>第 3 章</b>	<b>线性预测 .....</b>	<b>105</b>
3.1	前向线性预测 .....	105
3.2	后向线性预测 .....	110
3.3	列文森-杜宾算法 .....	114
3.4	预测误差滤波器的性质 .....	121
3.5	舒尔-科恩测试 .....	129
3.6	平稳随机过程的自回归建模 .....	130
3.7	Cholesky 分解 .....	133
3.8	格型预测器 .....	136
3.9	全极点、全通格型滤波器 .....	138
3.10	联合过程估计 .....	141
3.11	语音预测建模 .....	144
3.12	本章小结 .....	149
3.13	习题 .....	150
<b>第 4 章</b>	<b>最速下降算法 .....</b>	<b>159</b>
4.1	最速下降算法的基本思想 .....	159
4.2	最速下降算法应用于维纳滤波器 .....	160
4.3	最速下降算法的稳定性 .....	162
4.4	示例 .....	166
4.5	作为确定性搜索法的最速下降算法 .....	177
4.6	最速下降算法的优点与局限性 .....	178
4.7	本章小结 .....	179
4.8	习题 .....	179
<b>第 5 章</b>	<b>最小均方自适应滤波器 .....</b>	<b>183</b>
5.1	最小均方算法的结构与运算概述 .....	183
5.2	最小均方自适应算法 .....	185
5.3	应用示例 .....	188
5.4	统计 LMS 理论 .....	202
5.5	LMS 算法与最速下降算法的比较 .....	218
5.6	自适应预测的计算机实验 .....	218
5.7	自适应均衡的计算机实验 .....	223
5.8	最小方差无失真响应波束形成器的计算机实验 .....	228
5.9	非白噪声输入时 LMS 算法收敛的方向性 .....	230
5.10	LMS 滤波器的鲁棒性: $H^\infty$ 准则 .....	234
5.11	不同情况下步长参数的上界 .....	239
5.12	确定性输入时的转移函数方法 .....	240
5.13	本章小结 .....	243

5.14 习题 .....	244
<b>第 6 章 归一化最小均方自适应滤波器 .....</b>	<b>251</b>
6.1 归一化 LMS 滤波器作为约束最优化问题的解 .....	251
6.2 归一化 LMS 滤波器的稳定性 .....	254
6.3 回声消除中的步长控制 .....	256
6.4 实数据时收敛过程的几何考虑 .....	260
6.5 仿射投影滤波器 .....	261
6.6 本章小结 .....	267
6.7 习题 .....	267
<b>第 7 章 频域和子带自适应滤波器 .....</b>	<b>270</b>
7.1 块自适应滤波器 .....	270
7.2 快速块 LMS 算法 .....	274
7.3 无约束频域自适应滤波器 .....	278
7.4 自正交化自适应滤波器 .....	279
7.5 自适应均衡的计算机实验 .....	288
7.6 子带自适应滤波器 .....	292
7.7 自适应滤波算法的分类 .....	298
7.8 本章小结 .....	299
7.9 习题 .....	300
<b>第 8 章 最小二乘法 .....</b>	<b>303</b>
8.1 线性最小二乘估计问题 .....	303
8.2 数据开窗 .....	305
8.3 正交性原理的进一步讨论 .....	306
8.4 误差的最小平方和 .....	309
8.5 正则方程和线性最小二乘滤波器 .....	309
8.6 时间平均相关矩阵 $\Phi$ .....	312
8.7 根据数据矩阵构建正则方程 .....	313
8.8 最小二乘估计的特性 .....	316
8.9 MVDR 的谱估计 .....	320
8.10 MVDR 波束形成的正则化 .....	322
8.11 奇异值分解 .....	326
8.12 伪逆 .....	332
8.13 奇异值和奇异向量的解释 .....	333
8.14 线性最小二乘问题的最小范数解 .....	335
8.15 归一化最小均方算法看做欠定最小二乘小范数解 .....	337
8.16 本章小结 .....	339
8.17 习题 .....	339
<b>第 9 章 递归最小二乘自适应滤波器 .....</b>	<b>344</b>
9.1 预备知识 .....	344

9.2	矩阵求逆引理 .....	347
9.3	指数加权递归最小二乘算法 .....	347
9.4	正则化参数的选择 .....	350
9.5	误差平方加权和的更新递归 .....	352
9.6	示例:单个权值自适应噪声消除器 .....	353
9.7	RLS 算法的收敛性分析 .....	354
9.8	自适应均衡的计算机实验 .....	359
9.9	RLS 滤波器的鲁棒性 .....	361
9.10	本章小结 .....	366
9.11	习题 .....	366
<b>第 10 章</b>	<b>卡尔曼滤波器 .....</b>	<b>369</b>
10.1	标量随机变量的递归最小均方估计 .....	369
10.2	卡尔曼滤波问题 .....	372
10.3	新息过程 .....	374
10.4	应用新息过程进行状态估计 .....	376
10.5	滤波 .....	380
10.6	初始条件 .....	382
10.7	卡尔曼滤波器总结 .....	382
10.8	卡尔曼滤波器作为 RLS 滤波器的统一基础 .....	384
10.9	卡尔曼滤波器变形 .....	389
10.10	广义卡尔曼滤波器 .....	393
10.11	本章小结 .....	397
10.12	习题 .....	398
<b>第 11 章</b>	<b>平方根自适应滤波器 .....</b>	<b>403</b>
11.1	平方根卡尔曼滤波器 .....	403
11.2	在卡尔曼滤波器基础上构建平方根自适应滤波器 .....	408
11.3	QR-RLS 算法 .....	409
11.4	自适应波束形成 .....	415
11.5	逆 QR-RLS 算法 .....	421
11.6	本章小结 .....	423
11.7	习题 .....	423
<b>第 12 章</b>	<b>阶递归自适应滤波器 .....</b>	<b>426</b>
12.1	梯度自适应格型滤波器 .....	426
12.2	采用最小二乘估计的阶递归自适应滤波器:概述 .....	432
12.3	自适应前向线性预测 .....	433
12.4	自适应后向线性预测 .....	435
12.5	变换因子 .....	438
12.6	最小二乘格型预测器 .....	440
12.7	角度归一化估计误差 .....	448

12.8	格型滤波的一阶状态空间模型 .....	449
12.9	基于 QR 分解的最小二乘格型滤波器 .....	453
12.10	QRD-LSL 滤波器基本特性 .....	459
12.11	自适应均衡的计算机试验 .....	462
12.12	采用后验估计误差的递归最小二乘格型滤波器 .....	464
12.13	采用带误差反馈先验估计误差的递归 LSL 滤波器 .....	468
12.14	递归 LSL 滤波器和 RLS 滤波器的关系 .....	471
12.15	本章小结 .....	473
12.16	习题 .....	474
<b>第 13 章</b>	<b>有限精度效应 .....</b>	<b>481</b>
13.1	量化误差 .....	481
13.2	最小均方算法 .....	483
13.3	递归最小二乘算法 .....	490
13.4	平方根自适应滤波器 .....	495
13.5	阶递归自适应滤波器 .....	496
13.6	快速横向滤波器 .....	498
13.7	本章小结 .....	501
13.8	习题 .....	502
<b>第 14 章</b>	<b>时变系统的跟踪 .....</b>	<b>504</b>
14.1	系统辨识用马尔可夫模型 .....	504
14.2	非平稳度 .....	506
14.3	跟踪性能评价准则 .....	507
14.4	LMS 算法的跟踪性能 .....	509
14.5	RLS 算法的跟踪性能 .....	511
14.6	LMS 算法和 RLS 算法的跟踪性能比较 .....	514
14.7	如何改进 RLS 算法的跟踪性能 .....	517
14.8	系统辨识的计算机实验 .....	520
14.9	自适应常数的自动调节 .....	522
14.10	本章小结 .....	525
14.11	习题 .....	526
<b>第 15 章</b>	<b>无限脉冲响应自适应滤波器 .....</b>	<b>528</b>
15.1	IIR 自适应滤波器:输出误差法 .....	528
15.2	IIR 自适应滤波器:方程误差法 .....	532
15.3	某些实际考虑 .....	533
15.4	Laguerre 横向滤波器 .....	534
15.5	自适应 Laguerre 格型滤波器 .....	536
15.6	本章小结 .....	539
15.7	习题 .....	540