


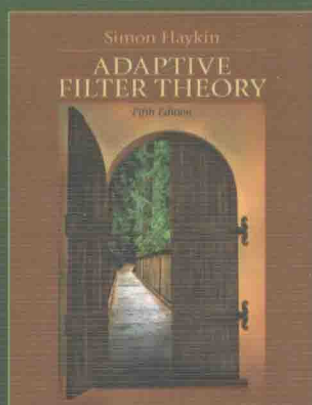
国外电子与通信教材系列

 Pearson

西蒙·赫金

自适应滤波器原理 (第五版)

Adaptive Filter Theory, Fifth Edition



[加] Simon Haykin 著
郑宝玉 等译



中国工信出版集团



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

自适应滤波器原理

(第五版)

Adaptive Filter Theory

Fifth Edition

[加] 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:随机过程与模型、维纳滤波器、线性预测、最速下降法、随机梯度下降法、最小均方(LMS)算法、归一化 LMS 自适应算法及其推广、分块自适应滤波器、最小二乘法、递归最小二乘(RLS)算法、鲁棒性、有限字长效应、非平衡环境下的自适应、卡尔曼滤波器、平方根自适应滤波算法、阶递归自适应滤波算法、盲反卷积,以及它们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。

Authorized Translation from the English language edition, entitled Adaptive Filter Theory, Fifth Edition, 9780132671453 by Simon Haykin, published by Pearson Education, Inc., Copyright © 2014 by Pearson Education, Inc. 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 Pearson Education, Inc.

CHINESE SIMPLIFIED language edition published by PEARSON EDUCATION ASIA LTD., and PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY Copyright © 2016.

本书中文简体字版专有出版权由 Pearson Education(培生教育出版集团)授予电子工业出版社。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:01-2013-4706

图书在版编目(CIP)数据

自适应滤波器原理:第5版/(加)赫金(Haykin, S.)著;郑宝玉等译. —北京:电子工业出版社,2016.5
(国外电子与通信教材系列)

书名原文:Adaptive Filter Theory, Fifth Edition

ISBN 978-7-121-25052-1

I. ①自… II. ①赫… ②郑… III. ①跟踪滤波器-高等学校-教材 IV. ①TN713

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 286314 号

策划编辑:马 岚

责任编辑:冯小贝

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

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:44 字数:1150 千字

版 次:2003 年 8 月第 1 版(原著第 4 版)

2016 年 5 月第 2 版(原著第 5 版)

印 次:2016 年 5 月第 1 次印刷

定 价:99.00 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, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:classic-series-info@phei.com.cn。

译者序

自适应信号处理是信号与信息处理学科一个重要的学科分支,并成功地应用于通信、控制、雷达、声呐、地震和生物医学工程等领域。由国际著名学者西蒙·赫金(Simon Haykin)教授编著并为我国广大读者所熟悉的《自适应滤波器原理》一书,全面、系统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,是自适应信号处理领域一部与时俱进的佳作。

该书自第一版1986年问世以来,三十年间,已出五版。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,再到第三版引入人工神经网络方法,直到第四版的局部修改和第五版的进一步修订,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,该书备受读者欢迎,影响与日俱增,赢得很高的声誉。相信该书第五版及其中译本的出版,必将对我国高校相关课程体系和内容改革起到一定的借鉴作用。

该书第五版除保持原书构思新颖、取材得当、概念清楚、论述严谨等特色外,内容有所取舍。例如:

- 增加了第5章“随机梯度下降法”和第11章“鲁棒性”;
- 在新版第6章的LMS算法和第10章的RLS算法中引入“统计效率”的概念,并用统计学习理论重新论述和分析了这两类算法的收敛性问题;
- 将原版第14章更名为“非平稳环境下的自适应”,并增加了相关内容,以作为新版的第13章;
- 删除了旧版本中与本书主题或实际应用关系不大的自适应IIR滤波器(原第11章)和反向传播学习(原第17章)两章内容,并把有关学习的概念放到新版第13章做适当介绍;
- 在“后记”中删除了与本书主题关系不大的“递归神经网络”和“非线性动力学”等内容,并引入反映该领域新进展的基于核(函数)的非线性自适应滤波等内容。

尽管有上述修改,但其涉及的主要内容和该书的适用范围没有大的变化。根据译者使用该书所积累的经验,再结合第五版翻译过程的体会,我们认为,新版本至少有以下几个特点:

- 进一步完善了体系结构,强化了数学基础。
- 更加注重新颖性、系统性与实用性的紧密结合。
- 更加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,为本书提供初稿和参与翻译工作的还有:王磊、朱艳、陈守宁、赵玉娟、孔繁坤、郑冬生、杜月林、余文斌、江雪、魏浩、林碧兰、钱程等老师和研究生。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。

前 言^①

新旧版本比较

本书新版本(第五版)对旧版本(第四版)进行了大量的修订。主要修改如下^②：

1. 引入了全新的第 5 章关于随机梯度下降法的内容。
2. 根据朗之万(Langevin)函数及相应的布朗运动,修改了第 6 章(旧版本第 5 章)中最小均方(LMS)的统计学习理论。
3. 引入了全新的第 11 章关于鲁棒性的内容。
4. 在第 13 章后半部引入非平稳环境下自适应的新内容,并将其应用于增量 Delta-Bar-Delta(IDBD)算法和自动步长方法。
5. 在附录 B 和附录 F 中分别引入关于微积分及朗之万函数的新内容。
6. 更新了参考文献,增列了“建议阅读文献”。
7. 删除了旧版本中“自适应 IIR 滤波器”和关于复数神经网络的“反向传播学习”两章。

本书新版要点

自适应滤波器是统计信号处理中的一个重要组成部分。它可对未知统计环境或非平稳环境下的各种信号处理问题,提供一种十分吸引人的解决方案,并且其性能通常远优于用常规方法设计的固定滤波器。此外,自适应滤波器还能够提供非自适应方法所不能提供的信号处理能力。因此,自适应滤波器已经成功应用于诸如通信、控制、雷达、声呐、地震和生物医学工程等诸多领域。

本书写作目的

本书写作的主要目的是研究各种线性自适应滤波器的数学原理。所谓自适应性是根据输入数据调整滤波器中的自由参数(系数)来实现的,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-输出映射都服从叠加原理,无论何时,在任意特定时刻,滤波器的参数都是固定的。

① 本书中文翻译版的一些字体、正斜体、图示、符号保留英文原版的写作风格,特此说明。——编者注

② 除这里所罗列的修改外,还包括散布在其他章节的许多修改。例如,第 6 章增加了关于 LMS 算法的最优性考虑和统计效率的新内容,第 10 章引入了关于 RLS 算法统计效率的新内容,第 14 章新增了关于信息滤波算法的独特特性和 Fisher 信息等内容。——译者注

线性自适应滤波问题不存在唯一的解。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。本书就提供了这样一套工具。

在背景方面，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及通信和控制系统等先修课程。

本书组成结构

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。

本书主体内容共 17 章，具体安排如下。

- 1) 随机过程与模型，这方面内容在第 1 章介绍，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。
- 2) 维纳滤波器理论及其在线性预测中的应用(第 2 章和第 3 章)，维纳滤波器在第 2 章中介绍，它定义了平稳环境下的最佳线性滤波器，而且提供了线性自适应滤波器的一个基本框架。第 3 章讲述了线性预测理论，着重讲述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。
- 3) 梯度下降法，在第 4 章和第 5 章中讲述。第 4 章介绍了一种固定型的古老最优化技术(即所谓最速下降法)的基础；该方法提供了维纳滤波器波的一种迭代演变框架。作为直接对比，第 5 章介绍了随机梯度下降法的基本原理；该方法非常适合处理非平稳环境，而且通过最小均方(LMS, least-mean-square)和梯度自适应格型(GAL, gradient adaptive lattice)算法阐明了其适用性。
- 4) LMS 算法族，涵盖了第 6 章、第 7 章、第 8 章三章，具体如下：
 - 第 6 章讨论了 LMS 算法的各种不同应用，详尽阐述了小步长统计理论。这一新的理论来源于非平衡热力学的朗之万方程，这为 LMS 算法的瞬态过程提供了一个比较准确的评估。计算机仿真证明了该理论的有效性。
 - 第 7 章和第 8 章扩展了传统的 LMS 算法族。这一点是通过详细论述归一化 LMS 算法、仿射投影自适应滤波算法、频域和子带自适应 LMS 滤波算法来实现的。仿射投影算法可看做介于 LMS 算法与递归最小二乘(RLS)算法的中间算法。频域和子带自适应 LMS 滤波算法将在后面讨论。
- 5) 最小二乘法 and RLS 算法，分别在第 9 章和第 10 章介绍。第 9 章论述了最小二乘法，它可看做源于随机过程的维纳滤波器的确定性副本。在最小二乘法中，输入数据是以块(block-by-block)为基础进行处理的。过去因其数值计算复杂性而被忽视的分块方法正日益引起人们的关注，这得益于数字计算机技术的不断进步。第 10 章在最小二乘法的基础上设计了 RLS 算法，并详尽阐述了其瞬态过程的统计理论。
- 6) 鲁棒性、有限字长效应和非平稳环境下的自适应问题，分别在第 11 章、第 12 章和第 13 章介绍。具体如下：
 - 第 11 章介绍了 H^∞ 理论，它为鲁棒性提供数学基础。在这一理论下，只要所选的步

长参数很小, LMS 算法在 H^∞ 的意义下就是鲁棒的;但在面对内在或外在干扰的非平稳环境时, RLS 算法的鲁棒性不如 LMS 算法。本章也讨论了确定性鲁棒性与统计有效性(效率)之间的折中问题。

- 第 5 ~ 10 章的线性自适应滤波算法理论以无限精度(字长)运算为基础。然而,当用数字形式实现任何自适应滤波算法时,将产生由有限精度运算所引起的有限字长效应。第 12 章讨论了 LMS 和 RLS 算法数字实现时的有限字长效应。
 - 第 13 章扩展了 LMS 和 RLS 算法理论。这是通过评价和比较运行于非稳定环境(设其为马尔可夫模型)下 LMS 和 RLS 算法的性能来实现的。这一章的第二部分主要研究两个新算法:其一为增量 Delta-Bar-Delta (IDBD) 算法,它由传统 LMS 算法的步长参数的向量化实现;其二为自动步长法,它以 IDBD 算法为基础,通过实验构成一个自适应步骤,以避免手动调整步长参数。
- 7) 卡尔曼滤波理论及相关的自适应滤波算法,这些内容在第 14 章、第 15 章、第 16 章中介绍,具体如下:
- 第 14 章介绍了 RLS 算法。实际上,RLS 算法是著名的卡尔曼滤波的一个特例。突出状态的概念是卡尔曼滤波的一个重要特点。因此,很好地理解卡尔曼滤波理论(也包括将平稳环境下的维纳滤波器作为其特例)是十分重要的。此外,应注意到协方差滤波和信息滤波算法是卡尔曼滤波器的变种。
 - 第 15 章在协方差滤波和信息滤波的基础上导出了它们各自的平方根形式。具体而言,就是引入前阵列和后阵列的思想,从而促使一类使用吉文斯(Givens)旋转脉动阵列的新的自适应滤波算法的产生。
 - 第 16 章介绍了另一类新的阶递归最小二乘格型(LSL)滤波算法,该算法也建立在协方差型和信息算法型卡尔曼滤波器的基础上。为了实现这类算法,需要利用一种数值鲁棒的所谓 QR 分解方法。阶递归 LSL 算法的另一个有吸引力的特点是其计算复杂度遵循线性规律。但是,这些算法的所有优点都是以数学和编码上的高度复杂性为代价的。
- 8) 无监督(自组织)自适应,即盲反卷积,在本书的最后一章即第 17 章介绍。这里所谓的“盲”表示在完成自适应滤波的过程中不需要期望响应的协助。这个艰巨任务是采用基于如下概念的模型完成的:
- 子空间分解,在本章第一部分介绍,提供了一个灵巧的数学上解决盲均衡问题的方法。为了解决这个问题,我们使用通信系统中固有的循环平稳性来寻找信道输入的二阶统计量,以使用无监督方式均衡信道。
 - 高阶统计量,在本章第二部分介绍,它可以是显式的或者隐式的。这部分内容致力于导出一类盲均衡算法,统称为 Bussgang 类盲均衡算法。本章第二部分还包含一类以源于最大熵法的信息理论方法为基础的新的盲均衡算法。

本书还包含一个后记,它分为两个部分:

- 后记第一部分回顾前面章节中介绍的内容,最后总结了鲁棒性、有效性(效率)和复杂性,并且说明了 LMS 和 RLS 算法在这三个根本性的重要工程问题上所起的作用。
- 后记第二部分包括以核函数(它起着计算单元隐层的作用)为基础的一类新的非线性

自适应滤波算法。这些核函数来源于再生核希尔伯特空间(RKHS)，而且这里给出的内容源自机器学习文献中已被很好研究的那些资料。特别是，后记将注意力聚焦于LMS滤波，包括传统LMS算法在其中所起的关键性作用；而且简要讨论了自适应滤波中这个相对较新的方法的属性和限制。

本书还包含如下内容的附录：

- 复变函数
- 沃廷格(Wirtinger)微分
- 拉格朗日(Lagrange)乘子法
- 估计理论
- 特征值分析
- 朗之万函数
- 旋转和反射
- 复数维萨特(Wishart)分布

在本书的不同部分，应用了由这些附录中给出的基本思想和方法。

辅助材料

- 本书还附有一个术语表，由一系列定义、记号、约定、缩略词和书中涉及的主要符号组成。
- 本书中引用的所有出版物都汇编在参考文献中。每篇参考文献包括作者姓名和出版年份。本书也包括了一个建议阅读部分，增加了许多其他参考文献以便读者进一步阅读。

例题、习题与计算机实验

本书各章包括大量例题，用来说明书中讨论的概念和理论。

本书还包括许多计算机实验，用来说明LMS和RLS算法的基础理论和应用。这些实验可以帮助读者比较这两种线性自适应滤波算法的不同性能。

本书每一章(除了绪论外)以习题作为结束，这出于以下两点考虑：

- 帮助读者更深刻地理解该章所包含的内容。
- 激励读者扩展该章所讨论的原理和方法。

题解手册

本书还配有对第1~17章所有习题详细解答的题解手册。选用本书作为教材的教师可直接向出版商申请题解手册。^①

^① 教辅申请方式请参见书末的“教学支持说明”。

所有计算机实验的 MATLAB 代码,可在网站 <http://www.pearsonhighered.com/haykin/> 上获得。^①

两个值得注意的符号

习惯上, -1 的平方根一般用斜体符号 j 表示,而微分算子(用于微分和积分中)一般用斜体符号 d 表示。然而,在实际中,这些术语既表示算子又表示符号,各自按照不同的方式行使功能,因此使用斜体符号表示它们并不正确。此外,斜体符号 j 和 d 也经常用做指数来表示其他事项,从而增加了潜在混淆的可能性。因此,在本书中,用正体 j 和 d 分别表示 -1 的平方根和微分算子。

使用说明

本书适合作为自适应信号处理方面的研究生课程的教材。在这个范围内,本书内容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。

我们希望本书对工业界的研究者和工程师,以及从事与自适应滤波器理论和应用有关的工作的人员也是有用的。

Simon Haykin
Ancaster, Ontario, Canada

^① 也可登录华信教育资源网(<http://www.hxedu.com.cn>)免费注册下载。

目 录

| | |
|-----------------------|-----------|
| 背景与预览 | 1 |
| 第 1 章 随机过程与模型 | 21 |
| 1.1 离散时间随机过程的部分特性 | 21 |
| 1.2 平均各态历经定理 | 22 |
| 1.3 相关矩阵 | 24 |
| 1.4 正弦波加噪声的相关矩阵 | 28 |
| 1.5 随机模型 | 29 |
| 1.6 Wold 分解 | 33 |
| 1.7 回归过程的渐近平稳 | 34 |
| 1.8 尤尔-沃克方程 | 36 |
| 1.9 计算机实验: 二阶自回归过程 | 37 |
| 1.10 选择模型的阶数 | 43 |
| 1.11 复值高斯过程 | 45 |
| 1.12 功率谱密度 | 46 |
| 1.13 功率谱密度的性质 | 48 |
| 1.14 平稳过程通过线性滤波器传输 | 49 |
| 1.15 平稳过程的 Cramér 谱表示 | 52 |
| 1.16 功率谱估计 | 53 |
| 1.17 随机过程的其他统计特征 | 56 |
| 1.18 多谱 | 57 |
| 1.19 谱相关密度 | 59 |
| 1.20 小结与讨论 | 61 |
| 1.21 习题 | 62 |
| 第 2 章 维纳滤波器 | 65 |
| 2.1 线性最优滤波: 问题综述 | 65 |
| 2.2 正交性原理 | 66 |
| 2.3 最小均方误差 | 70 |
| 2.4 维纳-霍夫方程 | 71 |
| 2.5 误差性能曲面 | 73 |
| 2.6 多重线性回归模型 | 76 |
| 2.7 示例 | 78 |
| 2.8 线性约束最小方差滤波器 | 81 |
| 2.9 广义旁瓣消除器 | 85 |

| | | |
|------------|--------------------------|------------|
| 2.10 | 小结与讨论 | 91 |
| 2.11 | 习题 | 92 |
| 第3章 | 线性预测 | 98 |
| 3.1 | 前向线性预测 | 98 |
| 3.2 | 后向线性预测 | 103 |
| 3.3 | 列文森-杜宾算法 | 107 |
| 3.4 | 预测误差滤波器的性质 | 114 |
| 3.5 | 舒尔-科恩测试 | 121 |
| 3.6 | 平稳随机过程的自回归建模 | 123 |
| 3.7 | Cholesky 分解 | 125 |
| 3.8 | 格型预测器 | 128 |
| 3.9 | 全极点、全通格型滤波器 | 131 |
| 3.10 | 联合过程估计 | 133 |
| 3.11 | 语音预测建模 | 136 |
| 3.12 | 小结与讨论 | 141 |
| 3.13 | 习题 | 142 |
| 第4章 | 最速下降法 | 150 |
| 4.1 | 最速下降算法的基本思想 | 150 |
| 4.2 | 最速下降算法应用于维纳滤波器 | 151 |
| 4.3 | 最速下降算法的稳定性 | 153 |
| 4.4 | 示例 | 157 |
| 4.5 | 作为确定性搜索法的最速下降算法 | 167 |
| 4.6 | 最速下降算法的优点与局限性 | 168 |
| 4.7 | 小结与讨论 | 169 |
| 4.8 | 习题 | 169 |
| 第5章 | 随机梯度下降法 | 173 |
| 5.1 | 随机梯度下降原理 | 173 |
| 5.2 | 应用1: 最小均方(LMS)算法 | 175 |
| 5.3 | 应用2: 梯度自适应格型滤波算法 | 179 |
| 5.4 | 随机梯度下降法的其他应用 | 185 |
| 5.5 | 小结与讨论 | 185 |
| 5.6 | 习题 | 186 |
| 第6章 | 最小均方(LMS)算法 | 188 |
| 6.1 | 信号流图 | 188 |
| 6.2 | 最优性考虑 | 189 |
| 6.3 | 应用示例 | 191 |
| 6.4 | 统计学习理论 | 206 |
| 6.5 | 瞬态特性和收敛性考虑 | 214 |

| | | |
|------------|------------------------------------|------------|
| 6.6 | 统计效率 | 216 |
| 6.7 | 自适应预测的计算机实验 | 218 |
| 6.8 | 自适应均衡的计算机实验 | 221 |
| 6.9 | 最小方差无失真响应波束成形器的计算机实验 | 228 |
| 6.10 | 小结与讨论 | 231 |
| 6.11 | 习题 | 232 |
| 第7章 | 归一化最小均方(LMS)自适应算法及其推广 | 238 |
| 7.1 | 归一化 LMS 算法作为约束最优化问题的解 | 238 |
| 7.2 | 归一化 LMS 算法的稳定性 | 241 |
| 7.3 | 回声消除中的步长控制 | 243 |
| 7.4 | 实数据时收敛过程的几何考虑 | 246 |
| 7.5 | 仿射投影滤波器 | 248 |
| 7.6 | 小结与讨论 | 252 |
| 7.7 | 习题 | 253 |
| 第8章 | 分块自适应滤波器 | 255 |
| 8.1 | 分块自适应滤波器: 基本思想 | 255 |
| 8.2 | 快速分块 LMS 算法 | 259 |
| 8.3 | 无约束频域自适应滤波器 | 263 |
| 8.4 | 自正交化自适应滤波器 | 264 |
| 8.5 | 自适应均衡的计算机实验 | 272 |
| 8.6 | 子带自适应滤波器 | 276 |
| 8.7 | 小结与讨论 | 282 |
| 8.8 | 习题 | 283 |
| 第9章 | 最小二乘法 | 286 |
| 9.1 | 线性最小二乘估计问题 | 286 |
| 9.2 | 数据开窗 | 288 |
| 9.3 | 正交性原理的进一步讨论 | 289 |
| 9.4 | 误差的最小平方和 | 291 |
| 9.5 | 正则方程和线性最小二乘滤波器 | 292 |
| 9.6 | 时间平均相关矩阵 Φ | 294 |
| 9.7 | 根据数据矩阵构建正则方程 | 296 |
| 9.8 | 最小二乘估计的性质 | 299 |
| 9.9 | 最小方差无失真响应(MVDR)的谱估计 | 302 |
| 9.10 | MVDR 波束成形的正则化 | 305 |
| 9.11 | 奇异值分解 | 309 |
| 9.12 | 伪逆 | 315 |
| 9.13 | 奇异值和奇异向量的解释 | 316 |
| 9.14 | 线性最小二乘问题的最小范数解 | 317 |

| | | |
|---------------|------------------------------------|------------|
| 9.15 | 归一化 LMS 算法看做欠定最小二乘估计问题的最小范数解 | 320 |
| 9.16 | 小结与讨论 | 321 |
| 9.17 | 习题 | 322 |
| 第 10 章 | 递归最小二乘 (RLS) 算法 | 326 |
| 10.1 | 预备知识 | 326 |
| 10.2 | 矩阵求逆引理 | 329 |
| 10.3 | 指数加权递归最小二乘算法 | 329 |
| 10.4 | 正则化参数的选择 | 332 |
| 10.5 | 误差平方加权更新的更新递归 | 334 |
| 10.6 | 示例: 单个权值自适应噪声消除器 | 335 |
| 10.7 | 统计学习理论 | 336 |
| 10.8 | 效率 | 341 |
| 10.9 | 自适应均衡的计算机实验 | 341 |
| 10.10 | 小结与讨论 | 344 |
| 10.11 | 习题 | 344 |
| 第 11 章 | 鲁棒性 | 346 |
| 11.1 | 鲁棒性、自适应和干扰 | 346 |
| 11.2 | 鲁棒性: 源于 H^∞ 优化的初步考虑 | 346 |
| 11.3 | LMS 算法的鲁棒性 | 349 |
| 11.4 | RLS 算法的鲁棒性 | 353 |
| 11.5 | 从鲁棒性的角度比较 LMS 和 RLS 算法 | 356 |
| 11.6 | 风险敏感的最优性 | 357 |
| 11.7 | 在鲁棒性与有效性(效率)之间的折中 | 358 |
| 11.8 | 小结与讨论 | 360 |
| 11.9 | 习题 | 360 |
| 第 12 章 | 有限字长效应 | 363 |
| 12.1 | 量化误差 | 363 |
| 12.2 | 最小均方算法 | 365 |
| 12.3 | 递归最小二乘算法 | 372 |
| 12.4 | 小结与讨论 | 377 |
| 12.5 | 习题 | 377 |
| 第 13 章 | 非平稳环境下的自适应 | 379 |
| 13.1 | 非平稳的前因后果 | 379 |
| 13.2 | 系统辨识问题 | 380 |
| 13.3 | 非平稳度 | 381 |
| 13.4 | 跟踪性能评价准则 | 382 |
| 13.5 | LMS 算法的跟踪性能 | 384 |
| 13.6 | RLS 算法的跟踪性能 | 386 |

| | | |
|---------------|---------------------------------|------------|
| 13.7 | LMS 算法和 RLS 算法的跟踪性能比较 | 390 |
| 13.8 | 自适应参数的调整 | 392 |
| 13.9 | IDBD 算法 | 394 |
| 13.10 | 自动步长法 | 398 |
| 13.11 | 计算机实验: 平稳和非平稳环境数据的混合 | 402 |
| 13.12 | 小结与讨论 | 405 |
| 13.13 | 习题 | 405 |
| 第 14 章 | 卡尔曼滤波器 | 409 |
| 14.1 | 标量随机变量的递归最小均方估计 | 409 |
| 14.2 | 卡尔曼滤波问题 | 412 |
| 14.3 | 新息过程 | 414 |
| 14.4 | 应用新息过程进行状态估计 | 416 |
| 14.5 | 滤波 | 420 |
| 14.6 | 初始条件 | 422 |
| 14.7 | 卡尔曼滤波器小结 | 423 |
| 14.8 | 卡尔曼滤波的最优性准则 | 425 |
| 14.9 | 卡尔曼滤波器作为 RLS 算法的统一基础 | 425 |
| 14.10 | 协方差滤波算法 | 430 |
| 14.11 | 信息滤波算法 | 431 |
| 14.12 | 小结与讨论 | 434 |
| 14.13 | 习题 | 435 |
| 第 15 章 | 平方根自适应滤波算法 | 438 |
| 15.1 | 平方根卡尔曼滤波器 | 438 |
| 15.2 | 在两种变形卡尔曼滤波器基础上构建平方根自适应滤波器 | 443 |
| 15.3 | QRD-RLS 算法 | 444 |
| 15.4 | 自适应波束成形 | 450 |
| 15.5 | 逆 QRD-RLS 算法 | 455 |
| 15.6 | 有限字长效应 | 458 |
| 15.7 | 小结与讨论 | 459 |
| 15.8 | 习题 | 460 |
| 第 16 章 | 阶递归自适应滤波算法 | 463 |
| 16.1 | 采用最小二乘估计的阶递归自适应滤波器: 概述 | 463 |
| 16.2 | 自适应前向线性预测 | 464 |
| 16.3 | 自适应后向线性预测 | 466 |
| 16.4 | 变换因子 | 469 |
| 16.5 | 最小二乘格型 (LSL) 预测器 | 471 |
| 16.6 | 角度归一化估计误差 | 479 |
| 16.7 | 格型滤波的一阶状态空间模型 | 480 |

| | | |
|---------------|-----------------------------|------------|
| 16.8 | 基于 QR 分解的最小二乘格型(QRD-LSL)滤波器 | 484 |
| 16.9 | QRD-LSL 滤波器基本特性 | 490 |
| 16.10 | 自适应均衡的计算机实验 | 493 |
| 16.11 | 采用后验估计误差的递归 LSL 滤波器 | 496 |
| 16.12 | 采用带误差反馈先验估计误差的递归 LSL 滤波器 | 499 |
| 16.13 | 递归 LSL 算法与 RLS 算法之间的关系 | 502 |
| 16.14 | 有限字长效应 | 504 |
| 16.15 | 小结与讨论 | 506 |
| 16.16 | 习题 | 507 |
| 第 17 章 | 盲反卷积 | 513 |
| 17.1 | 盲反卷积问题概述 | 513 |
| 17.2 | 利用循环平稳统计量的信道辨识 | 516 |
| 17.3 | 分数间隔盲辨识用子空间分解 | 517 |
| 17.4 | Bussgang 盲均衡算法 | 529 |
| 17.5 | 将 Bussgang 算法推广到复基带信道 | 542 |
| 17.6 | Bussgang 算法的特例 | 543 |
| 17.7 | 分数间隔 Bussgang 均衡器 | 546 |
| 17.8 | 信号源未知的概率分布函数的估计 | 550 |
| 17.9 | 小结与讨论 | 553 |
| 17.10 | 习题 | 554 |
| 后记 | | 557 |
| 附录 A | 复变函数 | 572 |
| 附录 B | 计算复梯度的沃廷格微分 | 583 |
| 附录 C | 拉格朗日乘子法 | 589 |
| 附录 D | 估计理论 | 592 |
| 附录 E | 特征分析 | 596 |
| 附录 F | 非平衡热力学的朗之万方程 | 617 |
| 附录 G | 旋转和映射 | 619 |
| 附录 H | 复数维萨特分布 | 637 |
| 术语 | | 640 |
| 参考文献 | | 650 |
| 建议阅读文献 | | 665 |
| 中英文术语对照表 | | 683 |

背景与预览

1. 滤波问题

估计器或滤波器通常用来从含有噪声的数据中提取人们感兴趣的、接近规定质量的信息。在这个意义下,估计理论及其方法应用于诸如通信、雷达、声呐、导航、地震学、生物学工程、金融工程等众多不同领域。例如,考虑一个数字通信系统,其基本形式由发射机、信道和接收机连接组成,如图1所示。发射机的作用是把数字源(例如计算机)产生的由0、1符号序列组成的消息信号变换为适合于信道上传送的波形。典型地,信道主要受到下列两种损伤:

- 符号间干扰 理想上,线性传输媒介定义为

$$h(t) = A\delta(t - \tau) \quad (1)$$

式中, t 表示连续时间, $h(t)$ 表示冲激响应, A 为幅度标度因子, $\delta(t)$ 是 Dirac δ 函数(即单位脉冲函数), τ 表示信号沿信道传送过程所产生的传播时延。式(1)是某一理想传输媒介的时域描述。等效地,我们可以在频域表征它,并写为

$$H(j\omega) = A \exp(-j\omega\tau) \quad (2)$$

式中, j 是 -1 的平方根, ω 表示角频率, $H(j\omega)$ 是传输媒介的频率响应,而 $\exp(\cdot)$ 表示指数函数。实际上,对任何物理信道,不可能满足由式(1)给出的理想时域描述[或式(2)等效频域描述]所包含的严格要求。我们尽最大努力所能做到的,也只是在表示发送信号基本谱内容的频带上逼近式(2),它将使物理信道发生色散(dispersive)。在数字通信系统中,这种信道损伤将引起符号间干扰(intersymbol interference),由此造成紧接着的脉冲(表示1、0发送序列)相互间模糊不清,以至于它们不再可区分。

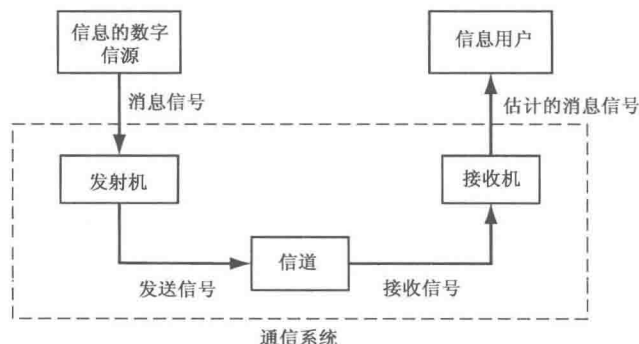


图1 通信系统框图

- 噪声 某种形式的噪声出现在每个通信信道的输出端。该噪声可以是系统内部的(由接收机前端放大器产生的热噪声)或系统外部的(由其他信源产生的干扰信号)。

这两种损伤的最终结果是,信道输出端收到的信号是含有噪声的或失真的发送信号。接收机作用是,操作接收信号并把原消息信号的一个可靠估值传递给系统输出端的某个用户。

作为估计理论及滤波器理论应用的另一个例子,考虑图 2 所示情况。图中表示一个连续时间动态系统,其 t 时刻的状态由多维向量 $\mathbf{x}(t)$ 表示。描述状态 $\mathbf{x}(t)$ 演变的方程通常受到系统误差的影响。滤波问题是复杂的,因为 $\mathbf{x}(t)$ 是隐蔽的而且能够观测它的唯一方法是通过间接测量,其测量方程是状态 $\mathbf{x}(t)$ 自身的函数。再则,该测量方程不可避免地受到它所拥有的噪声的影响。图 2 所描述的动态系统可以是飞行中的飞机,在这种情况下,飞机的位置和速度组成状态 $\mathbf{x}(t)$ 的元素,而测量系统可以是跟踪雷达。总之,给定测量系统在间隔 $[0, T]$ 内产生的可测向量 $\mathbf{y}(t)$ 及先验信息,我们的要求是估计动态系统的状态 $\hat{\mathbf{x}}(t)$ 。

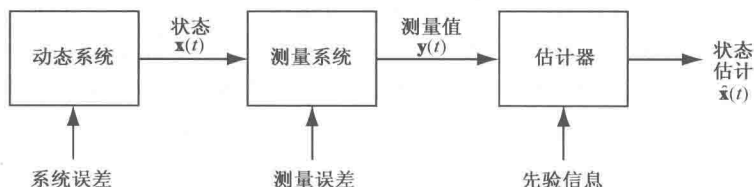


图 2 描绘状态估计中所涉及成分的框图

前面所述两个例子所阐明的估计理论实际上是统计的,因为不可避免地存在影响所研究系统正常运行的噪声或系统误差。

三种基本估计

三种基本的信息处理运算是滤波、平滑和预测,每一个运算由某一估计器来完成。这些估计方法之间的差异用图 3 来说明。

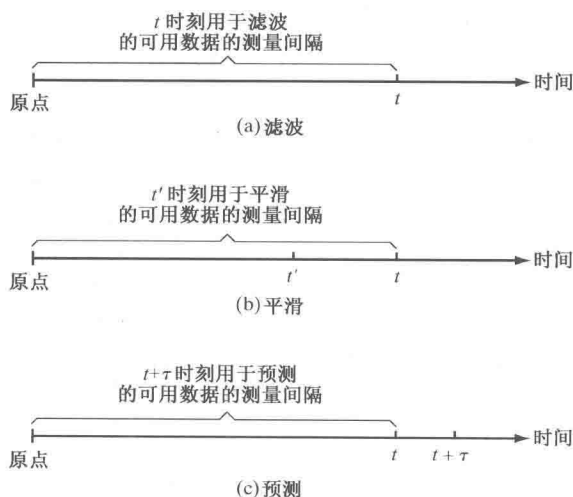


图 3 估计的基本形式示意图

- 滤波 (filtering) 它是用 t 时刻及以前的数据来提取或估计 t 时刻感兴趣信息的一种运算过程。
- 平滑 (smoothing) 它是一种后验形式的估计,它用感兴趣时刻之后的观测数据进行这