

WILEY

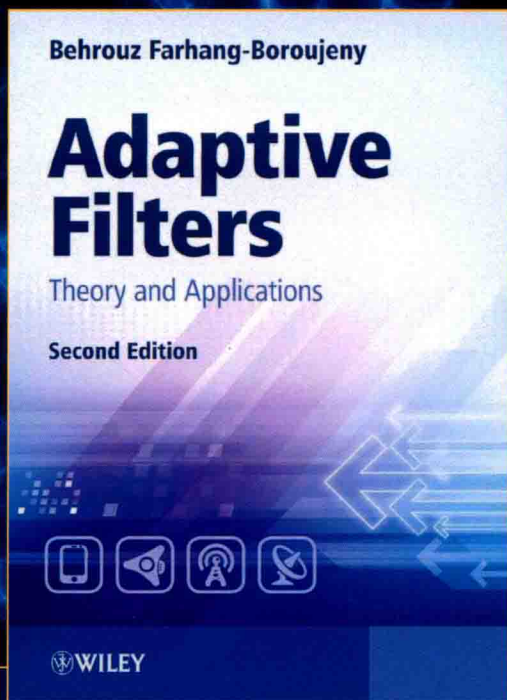
自适应滤波器原理及 Matlab仿真应用

(原书第2版)

[美] 贝赫鲁兹·法尔航·保罗耶尼 (Behrouz Farhang-Boroujeny) 著

韩芳明 译

Adaptive Filters
Theory and Applications
Second Edition

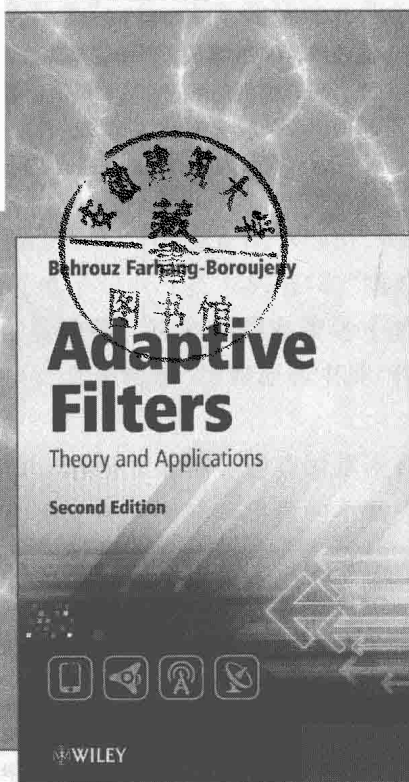


自适应滤波器原理及 Matlab仿真应用

(原书第2版)

[美] 贝赫鲁兹·法尔航·保罗耶尼 (Behrouz Farhang-Boroujeny) 著
韩芳明 译

Adaptive Filters
Theory and Applications
Second Edition



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

自适应滤波器原理及 Matlab 仿真应用 (原书第 2 版) / (美) 贝赫鲁兹·法尔航·保罗耶尼 (Behrouz Farhang-Boroujeny) 著; 韩芳明译. —北京: 机械工业出版社, 2018.1
(国外电子与电气工程技术丛书)

书名原文: Adaptive Filters: Theory and Applications, Second Edition

ISBN 978-7-111-58535-0

I. 自… II. ①贝… ②韩… III. Matlab 软件—应用—跟踪滤波器 IV. TN713

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 287417 号

本书版权登记号: 图字 01-2013-5976

Copyright © 2013 John Wiley & Sons, Ltd.

All rights reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Adaptive Filters: Theory and Applications, Second Edition, ISBN 978-1-119-97954-8, by Behrouz Farhang-Boroujeny, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由约翰·威利父子公司授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书内容。

本书封底贴有 Wiley 防伪标签, 无标签者不得销售。

本书反映了自适应滤波器领域的新动态, 基于工程方法讨论了维纳滤波器、特征分析理论、自适应滤波器、LMS 算法、最小二乘算法、跟踪、有源噪声控制、数据传输系统、传感器阵列、码分多址系统、OFDM 通信系统、MIMO 通信系统等方面的内容。书中提供了自适应滤波的 Matlab 仿真程序, 以帮助读者深入理解自适应算法的性能和特性。

本书可作为电子信息、通信工程专业高年级本科生和研究生的教材, 也可以作为信号处理工程师的参考书。

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 谢晓芳

责任校对: 李秋荣

印刷: 北京诚信伟业印刷有限公司

版次: 2018 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 185mm×260mm 1/16

印张: 29.5

书号: ISBN 978-7-111-58535-0

定价: 99.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光/邹晓东

出版者的话

文艺复兴以来，源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范，使西方国家在自然科学的各个领域取得了垄断性的优势；也正是这样的传统，使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中，美国的产业界与教育界越来越紧密地结合，信息学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线，由此而产生的经典科学著作，不仅擘划了研究的范畴，还揭示了学术的源变，既遵循学术规范，又自有学者个性，其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年，在全球信息化大潮的推动下，我国的信息产业发展迅猛，对专业人才的需求日益迫切。这对我国教育界和出版界都既是机遇，也是挑战；而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短的现状下，美国等发达国家在其信息科学发展的几十年间积淀和发展的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此，引进一批国外优秀教材将对我国教育事业的发展起到积极的推动作用，也是与世界接轨、建设真正的世界一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始，我们就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过多年的不懈努力，我们与Pearson、McGraw-Hill、Elsevier、John Wiley & Sons、CRC、Springer等世界著名出版公司建立了良好的合作关系，从他们现有的数百种教材中甄选出Alan V. Oppenheim、Thomas L. Floyd、Charles K. Alexander、Behzad Razavi、John G. Proakis、Stephen Brown、Allan R. Hambley、Albert Malvino、Peter Wilson、H. Vincent Poor、Hassan K. Khalil、Gene F. Franklin、Rex Miller等大师名家的经典教材，以“国外电子与电气技术丛书”和“国外工业控制与智能制造丛书”为系列出版，供读者学习、研究及珍藏。这些书籍在读者中树立了良好的口碑，并被许多高校采用为正式教材和参考书籍。其影印版“经典原版书库”作为姊妹篇也越来越多被实施双语教学的学校所采用。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑，这些因素使我们的图书有了质量的保证。随着电气与电子信息学科、自动化、人工智能等建设的不断完善和教材改革的逐渐深化，教育界对国外电气与电子信息类、控制类、智能制造类等相关教材的需求和应用都将步入一个新的阶段，我们的目标是尽善尽美，而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正，我们的联系方式如下：

华章网站：www.hzbook.com

电子邮件：hzjsj@hzbook.com

联系电话：(010)88379604

联系地址：北京市西城区百万庄南街1号

邮政编码：100037



华章教育

华章科技图书出版中心

译者序

自适应滤波理论是现代信号处理领域非常活跃且富有挑战性的一个方向。自适应滤波器可以通过感知外在环境和条件的变化而自适应地调节系统自身的结构参数来获取期望的输出结果,在雷达、通信、导航、自动控制、系统辨识、生物医学工程以及地震勘探等诸多领域均获得广泛应用。这种具备在线学习能力的自适应信号处理思想和理论也是机器学习和人工智能的重要基础。

本书是介绍自适应滤波器相关理论及其在各种工程实践中应用的一本较为全面而透彻的专著。本书第一版成书于1999年。在此基础上对相关内容,特别是最近几年发展的自适应滤波器应用,进行了补充和扩展,形成了目前的第2版。全书分为两大部分:第一部分为理论部分;第二部分为应用部分。在基础理论部分中,主要涉及自适应滤波器产生和发展的数学基础、基本原理和相关算法。从纵向上看,作者的叙述按照Wiener滤波器、LMS算法到变换域自适应滤波器及子带自适应滤波器等各种扩展自适应算法的顺序,由浅入深。从横向上看,作者对自适应滤波器的叙述由基本的FIR结构发展到IIR结构,再到格型结构,由简及繁。在实际应用部分,作者选取回音对消、有源噪声控制、自适应均衡、波束成形、CDMA系统中的自适应多用户检测以及近年来发展迅速的OFDM与MIMO通信作为自适应滤波器的典型应用进行介绍。全书内容的编排结构清晰、脉络分明;叙述深入浅出、通俗易懂。

本书的另一个特色是几乎每章后面均附有课后习题。这些习题可以分成两种类型:一般习题和与计算机有关的习题。一般习题主要涉及基本理论的推导和对关键知识点的巩固,对加深读者对正文内容的理解和掌握非常有帮助。而与计算机有关的习题往往结合某个应用场景,需要编写程序代码来完成结果的实现,极富启发性。这些习题的设计都非常精致,体现了作者的良苦用心。在译者讲授的本科生基础理论课“信号分析与处理”以及研究生课程“矩阵分析与应用”“现代信号处理”中,均会参考本书的课后习题来布置计算机仿真作业。学生普遍反映受益匪浅,有良好效果。

总体上,本书理论推导严谨,涉及知识面广,非常适合作为高年级本科生和研究生教材。对于一般的工程应用人员,本书也是了解自适应滤波器相关理论和扩展应用的一本很好的技术参考资料。

本书的翻译工作得到清华大学张贤达教授的支持和指导,在此深表谢意!同时,本书中文版的面世也得到国家自然科学基金的资助,在此一并表示感谢!

虽译者努力而为,囿于时间和水平有限,难免存在不足和疏漏之处,欢迎各位学术先辈、同仁和读者提出批评和指正意见!

韩芳明

前 言

本书起源于作者在自适应信号处理领域以及信号处理在通信系统中众多应用方面的研究工作和教学经验。本书第2版保留了第1版中自适应滤波器基本理论的介绍,同时极大地扩展了自适应滤波器在广大范围内的应用。新增的6章对自适应滤波器的不同应用进行深入分析。

本书适合作为自适应滤波器方面的研究生教材。同时,也可供实践工程师用作技术参考书。

关于自适应滤波器的一学期典型入门课程可包含第1章、第3~6章、第12章以及第11章的前半部分。第2章由对离散时间信号与系统的基本概念的简短回顾和一些随机信号分析的相关概念构成,可作为学生的自学内容。在同一学期也可以选讲本书的其他部分,或者更多的章节可以在高级主题和应用相关的第二学期课程中讲述。

在自适应滤波器的学习中,计算机仿真构成了理论分析与推导的重要补充成分。通常,理论分析和推导涉及许多近似或假设。因此,计算机仿真对于理论结果的验证变得必不可少。除此之外,已经证明计算机仿真是自适应滤波器的学习中深入理解不同自适应算法的性能与性质不可或缺的一个环节。MathWorks公司的Matlab可能是最常用的仿真软件包。在本书中,我们自始至终采用Matlab来给出仿真结果,以阐明和验证理论推导。用于产生这些结果的程序和数据文件可从本书的配套网站<http://as.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-1119979544.html#instructor>中下载。

本书另一个不可分割的部分是每章结尾的习题。除了前面几章以外,每章均提供两类习题。

1. **一般习题。**这些习题旨在强化读者在理论推导方面的技能。它们对正文中推导的结果进行拓展,并说明在实际问题中的应用。教师也可从本书的配套网站:<http://as.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-1119979544.html#instructor>[⊖]上得到这些习题的解答。

2. **与计算机有关的习题。**这些习题涉及计算机仿真,旨在加强读者对正文中介绍的不同自适应算法性能的理解。大多数此类习题基于配套网站上提供的Matlab程序。此外,也还有其他(开放的)面向仿真的习题,以便于读者编写自己的程序并对实际问题进行实验做准备。

本书假定读者具有一定的离散时间信号与系统(包括线性系统理论和随机信号分析导论)、复变理论和矩阵代数的背景知识。然而,第2章和第4章也给出了这些主题的概述。

本书第1章首先给出自适应滤波器的一般性概述。这一章回顾了许多应用例子,如系统建模、信道均衡、回音对消和天线阵列等。随后,第2章简单回顾了离散时间信号与系统,将适用于本书其他部分的相关概念置于一个框架下面。

第3章集中介绍了一类称为Wiener滤波器的最佳线性系统。Wiener滤波器是实现自适应滤波器的基础。注意,用于描述Wiener滤波器的代价函数是一个精致的选择,能得到数学上易于处理的问题。我们也在因果性和滤波器冲激响应的周期方面讨论了无约束Wiener滤波器。这一研究揭示了Wiener滤波器许多有意思的方面,并为本书其他部分中自适应滤波器的学习奠定了良好基础。特别地,我们发现当滤波器长度趋于无穷时,在极限情况下Wiener滤波器可以独立地处理相关过程的不同频率分量。数值例子表明,当滤波器长度有限

[⊖] 关于本书教辅资源,只有使用本书作为教材的教师才可以申请,需要的教师可向约翰·威立出版公司北京代表处申请,电话:010-8418 7869,电子邮件:sliang@wiley.com。——编辑注

时, 频率分量的分离可以在很好的近似范围内由频带的隔离所替代。对自适应滤波器的这种处理, 已被证明对于自适应滤波器的学习是一种启发式的工程方法, 将始终贯穿于本书。

特征分析是自适应滤波器研究中的一种基本数学工具。第 4 章前半部分包含了对这一主题的完整介绍。该章后半部分给出了横向 Wiener 滤波器性能表面的分析。随后在第 5 章介绍了搜索方法。这一章讨论的搜索方法是在实践中用于自适应滤波器实际实现的统计搜索方法的理想化版本。它们在假设先验已知相关过程统计特性的意义上是理想化的。

著名的最小均方(LMS)算法在第 6 章中进行介绍, 并在第 7~11 章中广泛研究。由 Widrow 和 Hoff 于 20 世纪 60 年代首先提出的 LMS 算法, 由于在实践中的简洁性和对信号统计特性的鲁棒性而成为应用最为广泛的自适应滤波算法。

第 12 章和第 13 章介绍最小二乘方法。这一讨论虽然简短, 但它给出了最小二乘方法的基本概念, 并突出了与基于 LMS 的算法相比较时的优劣。第 13 章介绍了最小二乘算法的快速版本。总体上, 这两章为读者参考更为高级的书籍或论文方面继续这一主题的研究奠定了良好基础。

第 14 章讨论跟踪问题。在系统建模问题的背景下, 给出了 LMS 算法的一般性表述, 它涵盖了本书前面各章讨论的大部分算法, 因而为不同算法的比较提供了公共平台。同时, 也讨论了如何优化 LMS 算法的步长参数和 RLS 算法的遗忘因子以取得良好的跟踪性能。

第 15~20 章包含了前面各章的理论结果在许多实际问题中的广泛应用。第 15 章给出了与回音对消器相关的许多实际问题。这一章的重点是远程会议应用所遇到的回音对消。在这一应用中, 我们需要处理自适应传统理论领域并未包含的特殊问题。例如, 当位于电话线两端的双方同时讲话时, 他们各自的信号会相互干扰, 因此电话线两端回音对消器的自适应均会遭到破坏。所以, 应该设计特殊的双端会话检测方法。我们也详细讨论了近年来发展迅速的立体声回音对消器。

第 16 章讨论与有源噪声对消控制相关的问题。它们在一定程度上也不同于传统的自适应滤波问题。

第 17 章涉及通信系统中的同步和信道均衡相关的问题。虽然针对信道均衡发展了许多经典自适应滤波器理论的基本原理, 但是在通信系统领域也有许多特殊问题只能用新的概念来进行描述, 它们可看作自适应滤波器经典理论的扩展。该章给出了许多这样的扩展。

传感器阵列处理和码分多址(CDMA)是自适应滤波器已得到广泛应用的两个领域。虽然它们看似两个非常不同的应用, 但若得到理解, 它们则存在许多相似之处, 可以使我们将一个应用中的结果也用到另一个中。由于传感器阵列处理先于 CDMA 得到发展, 我们便遵循这一历史发展, 第 18 章介绍传感器阵列处理技术, 接着第 19 章讨论 CDMA 理论和相关算法。

第 20 章讨论自适应滤波器在设计和实现多载波系统(或正交频分复用——OFDM)以及在发射端和接收端具有多根天线的通信系统(称为多输入多输出——MIMO)方面的最新进展。该章解释一些与这些现代信号处理技术相关的实际问题, 并介绍几个在当前标准, 如 WiFi、WiMax 和 LTE 中已采用的解决方案。

本书采用如下符号表示。我们用非粗体小写字母表示标量, 粗体小写字母表示向量, 粗体大写字母表示矩阵。非粗体大写字母用于表示变量函数, 如 $H(z)$, 以及向量/矩阵的长度/维数。小写字母“ n ”用于表示时间变量。在诸如第 8 章和第 9 章讨论的分块处理算法情形中, 仍以小写字母“ k ”作为块编号。时间编号和块编号置于方括号中, 而下标用于指代向量和矩阵的元素。例如, 时变抽头权向量 $w(n)$ 的第 i 个元素表示为 $w_i(n)$ 。上标“ T ”和“ H ”分别表示向量或矩阵的转置和 Hermitian 转置。我们保持所有向量为列形式。更为特殊的符号将在正文中必要的地方进行解释。

致 谢

本书第 1 版和当前版的面世离不开我过去 20 年间所有学生的贡献。我对他们的支持、热心和鼓励表示感谢!

感谢英国南安普敦大学的 Stephen Elliott 教授审阅了第 16 章, 并提出许多宝贵意见。同时感谢 Vellenki Umapathi Reddy 教授审阅了第 2~7 章, 提出了宝贵建议并给予我精神上的支持。在此特别感谢日立环球存储科技公司的 George Mathew 博士对本书第 1 版通篇进行了严格审查。

许多同事在课堂上采用本书第 1 版作为教材成为激励我编写本书第 2 版的动力。希望他们能感到本版通过介绍更多自适应滤波器在前沿应用中的实例而更有助于拓宽研究生的知识面。

目 录

出版者的话	5.3 特征值分散的影响	74
译者序	5.4 Newton 法	75
前言	5.5 Newton 法的另一种解释	76
致谢	习题	77
第 1 章 引言	第 6 章 LMS 算法	79
1.1 线性滤波器	6.1 LMS 算法的起源	79
1.2 自适应滤波器	6.2 LMS 算法抽头权系数的 平均行为	80
1.3 自适应滤波器结构	6.3 LMS 算法的 MSE 性能	83
1.4 自适应方法	6.4 计算机仿真	89
1.5 自适应滤波器的实数形式与 复数形式	6.5 简化的 LMS 算法	96
1.6 应用	6.6 归一化 LMS 算法	97
第 2 章 离散时间信号与系统	6.7 仿射投影 LMS 算法	99
2.1 序列与 z 变换	6.8 可变步长 LMS 算法	102
2.2 Parseval 关系	6.9 复值信号的 LMS 算法	103
2.3 系统函数	6.10 再论波束成形	105
2.4 随机过程	6.11 线性约束的 LMS 算法	107
习题	习题	109
第 3 章 Wiener 滤波器	附录 6A 式(6.39)的推导	116
3.1 最小均方误差准则	第 7 章 变换域自适应滤波器	117
3.2 Wiener 滤波器——横向、 实值情况	7.1 变换域自适应滤波器概述	117
3.3 正交性原理	7.2 正交变换的频带分割特性	118
3.4 归一化性能函数	7.3 正交变换的正交化特性	119
3.5 向复值情形的推广	7.4 变换域 LMS 算法	120
3.6 无约束 Wiener 滤波器	7.5 理想的 LMS-Newton 算法及 其与 TDLMS 算法的关系	122
3.7 总结与讨论	7.6 变换 \mathcal{T} 的选择	122
习题	7.7 变换	129
第 4 章 特征分析与性能表面	7.8 滑动变换	130
4.1 特征值和特征向量	7.9 总结与讨论	137
4.2 特征值和特征向量的性质	习题	138
4.3 性能表面	第 8 章 自适应滤波器的分块 实现	142
习题	8.1 分块 LMS 算法	142
第 5 章 搜索方法	8.2 数学背景	144
5.1 最陡下降法	8.3 FBLMS 算法	147
5.2 学习曲线		

8.4 分割的 FBLMS 算法	152	11.12 极-零点格型结构	219
8.5 计算机仿真	159	11.13 自适应格型滤波器	220
习题	160	11.14 随机过程的自回归模型	223
附录 8A BLMS 算法失调方程的 推导	163	11.15 基于自回归模型的自适应 算法	224
附录 8B FBLMS 算法失调方程的 推导	164	习题	233
第 9 章 子带自适应滤波器	168	附录 11A $E[u_n(n)x^T(n)K(n)x(n)u_n^T(n)]$ 的计算	236
9.1 DFT 滤波器组	168	附录 11B 参数 γ 的计算	237
9.2 互补滤波器组	171	第 12 章 最小二乘方法	239
9.3 子带自适应滤波器结构	173	12.1 针对线性组合器提出的最小 二乘估计	239
9.4 分析与综合滤波器的选取	174	12.2 正交性原理	240
9.5 计算复杂性	175	12.3 投影算子	242
9.6 欠采样因子与混叠现象	176	12.4 标准递推最小二乘算法	242
9.7 低时延分析与综合滤波器组	177	12.5 RLS 算法的收敛行为	246
9.8 子带自适应滤波器的设计 方法	180	习题	251
9.9 一个例子	181	第 13 章 快速 RLS 算法	254
9.10 与 FBLMS 算法的比较	182	13.1 最小二乘前向预测	254
习题	183	13.2 最小二乘后向预测	255
第 10 章 IIR 自适应滤波器	185	13.3 最小二乘网格	256
10.1 输出误差法	186	13.4 RLSL 算法	258
10.2 方程误差法	189	13.5 FTRLs 算法	267
10.3 案例分析 I: IIR 自适应 谱线增强	191	习题	271
10.4 案例分析 II: 磁记录信道的 均衡器设计	197	第 14 章 跟踪	273
10.5 结论	202	14.1 跟踪问题的提出	273
习题	203	14.2 LMS 算法的广义描述	274
第 11 章 格型滤波器	205	14.3 广义 LMS 算法的 MSE 分析	274
11.1 前向线性预测器	205	14.4 最优步长参数	276
11.2 后向线性预测器	206	14.5 传统算法的比较	278
11.3 前向与后向预测器之间的 关系	207	14.6 基于最优步长参数的比较	281
11.4 预测误差滤波器	207	14.7 VSLMS: 具有最优跟踪行为的 算法	282
11.5 预测误差的性质	208	14.8 遗忘因子可变的 RLS 算法	287
11.6 格型结构的推导	209	14.9 总结	288
11.7 格型作为一种正交化变换	212	习题	289
11.8 格型联合过程估计器	213	第 15 章 回音对消	291
11.9 系统函数	214	15.1 问题描述	291
11.10 转换	214	15.2 结构与自适应算法	292
11.11 全极点格型结构	218	15.3 双端会话检测	303

15.4 啸鸣抑制	307	17.8 最大似然检测	373
15.5 立体语音回音对消	309	17.9 软均衡	374
附录 15A 多窗谱方法	320	17.10 单输入多输出均衡	381
附录 15B 双通道 Levinson-Durbin 算法的推导	323	17.11 频域均衡	383
第 16 章 有源噪声控制	325	17.12 盲均衡	386
16.1 宽带前馈单通道 ANC	326	习题	388
16.2 窄带前馈单通道 ANC	329	第 18 章 传感器阵列处理	391
16.3 反馈单通道 ANC	337	18.1 窄带传感器阵列	391
16.4 多通道 ANC 系统	339	18.2 宽带传感器阵列	401
附录 16A 式(16.46)的推导	342	18.3 鲁棒波束成形	404
附录 16B 式(16.53)的推导	342	习题	409
第 17 章 数据传输系统的同步与 均衡	343	第 19 章 码分多址系统	411
17.1 连续时间信道模型	343	19.1 CDMA 信号模型	411
17.2 离散时间信道模型与均衡器 结构	346	19.2 线性检测器	413
17.3 定时恢复	349	19.3 自适应方法	418
17.4 均衡器设计与性能分析	357	习题	420
17.5 自适应算法	365	第 20 章 OFDM 与 MIMO 通信	421
17.6 循环均衡	365	20.1 OFDM 通信系统	421
17.7 联合定时恢复、载波恢复与 信道均衡	372	20.2 MIMO 通信系统	432
		20.3 MIMO-OFDM	440
		习题	440
		参考文献	442
		术语表	456

在我们将要开始“自适应滤波器”的学习之时，可能值得去理解术语“自适应”与“滤波器”在一般意义上的内涵。“自适应”可通过考虑一个试图调整其自身以对正在其周围发生的某一现象做出反应的系统来理解。换言之，系统试图调节其参数来达到由系统自身状态和外围参数所确定的某个明确定义的目标。这就是“自适应”的含义所在。另外，还需要使“自适应”过程得以执行的一系列步骤或程序。最后，执行或经历“自适应”过程的“系统”有一个更技术化但更普及的名字“滤波器”——这是工程师们很熟悉也非常喜欢的一个术语。显然，依赖于自适应过程达到最终目标所需要的时间（我们称为收敛时间）以及执行自适应可用的复杂性/资源，我们可以拥有很多自适应算法和滤波器结构。从这一观点出发，我们可以将本书的内容/贡献归结为“从收敛性与复杂性的角度，对部分自适应算法、实现及相关滤波器结构的研究”。

1.1 线性滤波器

术语滤波器一般指从其输入端获取粒子/元素的混合，并根据一些特定的准则对其进行处理以在输出端产生相应的粒子/元素集合的设施或系统。在信号与系统的语境中，粒子/元素是指信号的频率分量。传统上，滤波器用于保留属于某一特殊频带中的频率分量，同时尽可能抑制其余频率分量。在更加一般的意义上，术语滤波器指用于重塑输入信号的频率分量而产生具有某些理想特性输出的系统。这也是以后各章中我们如何看待滤波概念的方式。

滤波器（或一般地，系统）可能是线性的或非线性的。在本书中，我们仅考虑线性滤波器，重点也在于离散时间信号与系统。因而，所有信号均表示为序列，如 $x(n)$ 。线性系统最基本的特征是其行为由叠加原理所支配。这意味着如果离散时间线性系统对输入序列 $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$ 的响应分别为 $y_1(n)$ 和 $y_2(n)$ ，则该系统对输入序列 $x(n) = ax_1(n) + bx_2(n)$ 的响应将为 $y(n) = ay_1(n) + by_2(n)$ ，其中 a 和 b 为任意常数。在“线性系统理论”中，根据该属性可得出许多有意思的结论。特别地，一个线性系统可完全由该系统的冲激响应或其 Fourier 变换（称为传递函数）来刻画。在任意频率上，系统的传递函数等于其在该频率上的增益。换言之，应用前面讨论的术语，我们可以说一个系统的传递函数决定了输入信号的不同频率分量受其改变的程度。

图 1.1 画出了滤波器的一般性系统框图，其中强调了其用于本书中讨论的不同问题的目的。特别地，滤波器用于重塑一定的输入信号以使得其输出为给定期望信号的一个好的估计。选择滤波器参数（系数）以取得期望信号与滤波器输出之间的最好匹配的过程通常是通过优化某个合适定义的性能函数

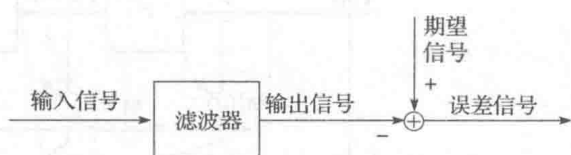


图 1.1 滤波器系统框图，强调了其在重塑输入信号以匹配理想信号中的作用

来完成的。性能函数可以在统计或确定的框架下来定义。在统计方法中，最常用的性能函数是误差信号（即期望信号与滤波器输出之差）的均方值。对于平稳的输入和期望信号，最小化均方误差（MSE）将产生称为均方意义上最优的著名的 Wiener 滤波。有关 Wiener 滤波器的主题将在第 3 章广泛讨论。本书研究的大部分自适应算法都是 Wiener 滤波器的实际

解。在确定性方法中，性能函数的一般选择是误差信号平方的加权和。最小化该函数将得到对于给定数据集最优的滤波器。然而，在一些对数据的统计属性假设下，对于大数据长度，确定性解将逼近统计解，即 Wiener 滤波器。第 12 章和第 13 章将详细讨论确定性方法。关于随机(即统计)和确定框架下自适应问题的简短综述，读者可参阅 1.4 节。

1.2 自适应滤波器

如前所述，用于估计给定期望信号的滤波器既可以利用随机性方法也可以利用确定性方法进行设计。在确定性方法中，滤波器的设计需要利用滤波器应该处理的给定数据集计算一定的平均量。另一方面，Wiener 滤波器的设计(即在随机方法中)需要相关信号的先验统计知识。严格来说，这些统计量的可靠估计需要大量的信号序列实现。该方案实际上是不可行的，因为对于每个信号序列我们通常只有一个实现。为解决这一问题，假定信号序列是各态历经的，这意味着它们是平稳的，且其统计平均与时间平均相一致。因而，即使每个信号序列仅有一个实现，利用时间平均也可设计 Wiener 滤波器。

虽然为获得设计 Wiener 滤波器或其他最优滤波器的必要信息而对信号平均的直接测量是可能的，但在大部分应用中信号平均(统计)都是以间接方式使用的。本书所涉及的所有算法都将滤波器的输出误差与滤波器输入样本以一定的方式做相关运算，并在递推方程中使用所得结果来迭代调节滤波器系数。以迭代方式来求解自适应滤波问题的原因如下。

(1) 直接计算必要的平均值及滤波器系数需要积累大量的信号样本。另一方面，迭代解不需要积累信号样本。因此，大大节省了内存。

(2) 在迭代解中需要信号样本的积累及其后续处理以产生滤波器输出，这会造成滤波器输出的极大时延，在许多应用中是无法接受的。相反，迭代解不会在滤波器输出端造成任何显著的时延。

(3) 迭代的使用使得自适应解具有一定的跟踪能力。也就是说，如果信号的统计量随时间变化，迭代调节滤波器系数得出的解将可以与新的统计相匹配。

(4) 一般来说，迭代解在软件或硬件实现中的代码将比非迭代解更为简单。

1.3 自适应滤波器结构

在自适应滤波器的实现中，最常使用的结构为如图 1.2 所示的横向结构。这里滤波器具有单个输入 $x(n)$ 和单个输出 $y(n)$ 。序列 $d(n)$ 为期望信号。输出 $y(n)$ 是根据式(1.1)由输入序列 $x(n)$ 时延样本的线性组合产生的。

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} w_i(n)x(n-i) \quad (1.1)$$

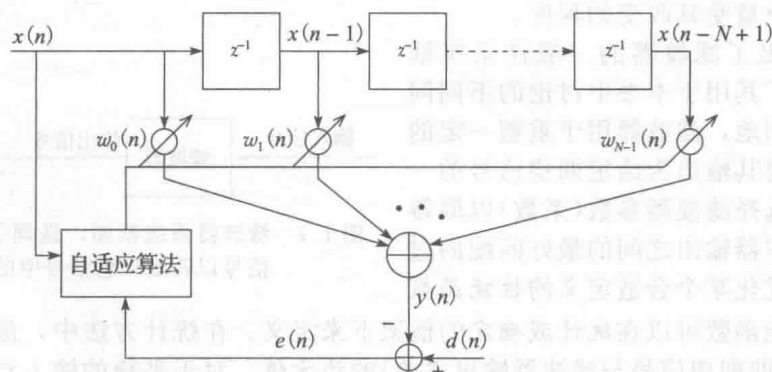


图 1.2 自适应横向滤波器

其中: $w_i(n)$ 为滤波器抽头权(系数); N 为滤波器长度。我们称输入样本 $x(n-i)$, $i=0, 1, \dots, N-1$ 为滤波器抽头输入。抽头权 $w_i(n)$ 可能会随时间变化而变化, 并受控于自适应算法。

在一些应用中, 如波束成形(1.6.4 小节), 滤波器的抽头输入并非单一输入的时延样本。在这种情况下, 假定自适应滤波器的结构具有如图 1.3 所示的形式。这种形式称为线性组合器, 因为其输出是抽头输入所接收的不同信号的一个线性组合, 即

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} w_i(n) x_i(n) \quad (1.2)$$

注意, 线性组合器结构比横向结构更为普遍。后者作为前者的一种特殊情形, 可以通过选择 $x_i(n) = x(n-i)$ 来得到。

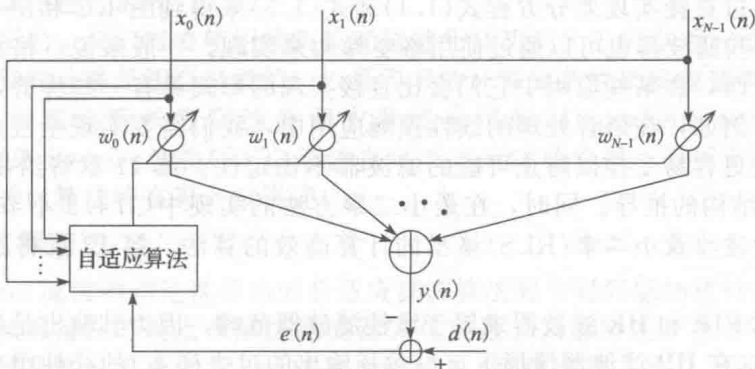


图 1.3 自适应线性组合器

图 1.2 和图 1.3 所示的结构是一种非递推滤波器, 即滤波器输出的计算不包含任何反馈机制。我们亦称图 1.2 所示的为有限冲激响应(FIR)滤波器, 因为其冲激响应具有有限时间周期。无限冲激响应(IIR)滤波器由递推方程来支配, 例如(见图 1.4):

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i(n) x(n-i) + \sum_{i=1}^{M-1} b_i(n) y(n-i) \quad (1.3)$$

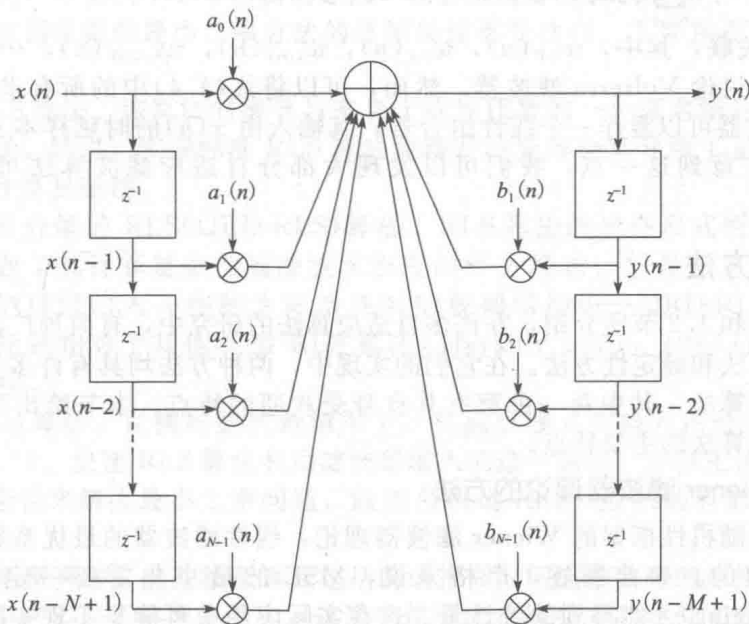


图 1.4 IIR 滤波器结构

其中： $a_i(n)$ 与 $b_i(n)$ 分别为前馈与反馈抽头权系数。IIR 滤波器已经在许多场合得到应用。然而，正如我们在后面各章将会看到，由于 IIR 滤波器的自适应将涉及许多困难，因此它在自适应滤波器领域的应用相当有限。特别地，它很容易变得不稳定，因为通过自适应过程其极点可能会转移到单位圆（即，在 z 平面中 $|z|=1$ 表示的圆，第 2 章）外面。此外，IIR 滤波器的性能函数（例如，以滤波器系数为函数的 MSE）通常有许多局部极小点。这将或许导致滤波器收敛到一个局部最小点而非希望的性能函数的全局最小点。反之，FIR 滤波器和线性组合器的 MSE 为具有单个最小点的良态二次函数。该最小点可以很容易地通过许多自适应来找到。因为这些原因，在许多自适应滤波器的应用中非递推滤波器成为唯一选择。因此，后续章节的大部分讨论均限定为非递推滤波器。第 10 章将讨论具有两个特殊应用样例的 IIR 自适应滤波器。

我们分别通过直接实现差分方程式(1.1)和式(1.3)来得到图 1.2 和图 1.4 所示的 FIR 和 IIR 结构。这些滤波器也可以通过使用格型结构来实现。一般来说，格型结构比直接实现要更复杂。然而，在某些应用中它们会比直接实现的形式具有一些优势，而使得它们成为更好的选择。例如，在语音处理的线性预测应用中，我们需要实现全极点(IIR)滤波器。此时，格型结构更容易受控以防止可能的滤波器不稳定性。第 11 章将给出 FIR 滤波器与 IIR 滤波器格型结构的推导。同时，在最小二乘方法的实现中(1.4.2 小节)，格型结构的运用将得到称为递推最小二乘(RLS)格型的计算高效的算法。第 13 章将给出该算法的一个推导。

上面讨论的 FIR 和 IIR 滤波器隶属于线性滤波器范畴，因为其输出是通过输入的当前样本和过去样本（在 IIR 滤波器情形下，也包括输出的过去样本）的线性组合而获得的。虽然大部分应用仅限于使用线性滤波器，但一些应用中隐含的物理现象远非线性所能建模，此时必须使用非线性滤波器。一个典型的例子是磁记录。由于介质上写入的磁化转换间的相互作用，记录信道在高密度时成为非线性的。在该应用中通常使用系统的 Volterra 序列表示。Volterra 系统的输出 $y(n)$ 通过方程

$$y(n) = w_{0,0}(n) + \sum_i w_{1,i}(n)x(n-i) + \sum_{i,j} w_{2,i,j}(n)x(n-i)x(n-j) + \sum_{i,j,k} w_{3,i,j,k}(n)x(n-i)x(n-j)x(n-k) + \dots \quad (1.4)$$

与输入 $x(n)$ 相关联，其中， $w_{0,0}(n)$ ， $w_{1,i}(n)$ ， $w_{2,i,j}(n)$ ， $w_{3,i,j,k}(n)$ ， \dots 为滤波器系数。本书不再进一步讨论 Volterra 滤波器。然而，可以将式(1.4)中的所有求和项放在一起，而 Volterra 滤波器可以看作一个线性组合器，其输入由 $x(n)$ 的时延样本及其相互之间的乘积所确定。注意到这一点，我们可以发现大部分自适应滤波算法可以直接扩展到 Volterra 滤波器。

1.4 自适应方法

正如 1.1 节和 1.2 节所介绍，在许多自适应算法的研究中，有两种广泛使用的不同方法，即随机性方法和确定性方法。在它们的实现中，两种方法均具有许多变形，从而可以得到丰富多样的算法，其中每一种都有其自身受欢迎的特点。本节给出这两种方法的综述，并突出相关算法的主要特点。

1.4.1 基于 Wiener 滤波器理论的方法

根据来自于随机性框架的 Wiener 滤波器理论，线性滤波器的最优系数是通过最小化其 MSE 来求解的。如前所述，严格来说，MSE 的最小化需要一定的通过集平均(ensemble averaging)才能得到的统计量。这在实际应用中可能是不现实的。我们通过使用各态历经性来解决这一问题，因此使用时间平均而不是集平均。另外，为获得简单的递推算法，我们对所需的统计量使用了非常粗略的估计。事实上，在诸多自适应滤波应用中

最基本的、使用最广泛的、著名的最小均方(LMS)算法使用了误差信号平方的瞬时值作为其MSE的一个估计。结果表明,当对Wiener滤波器最优系数的搜索过程中使用一个小的步长参数时,这个对MSE的粗略估计会得到一个非常简单却可靠的自适应算法。

LMS算法的主要不足在于其收敛行为高度依赖于滤波器输入的功率谱密度。当滤波器输入为白色(即其功率谱在整个频带范围内平坦)时,LMS算法可以快速收敛。然而,当一定的频带没有得到较好激发(即在这些频带上信号能量相对较低)时,将出现缓慢收敛的模式,从而导致相对于白色输入情形下慢得多的收敛性。换言之,为使收敛速度加快,LMS算法需要同时激发整个频带。认识到了这一点,这些年来研究人员已经提出了很多有效的算法。这些算法将输入信号的频带分解为许多子带,并在运用自适应算法之前使用一些功率归一化机制取得了一定程度上的信号白化。这些算法以不同的形式出现,并将在第7、9和11章中进行讲述。

在一些应用中,我们需要使用抽头长度超过几百甚至几千的自适应滤波器。显然,实现这样的滤波器其计算是相当昂贵的。以低得多的计算复杂性来实现这种滤波器的一个有效方式是,正如在实现长数字滤波器中普遍采用的(Oppenheim and Schaffer, 1975, 1989),运用快速Fourier变换(FFT)算法在频域完成时域卷积。运用FFT算法来降低计算复杂性的自适应算法将在第8章讲述。

1.4.2 最小二乘方法

基于Wiener滤波器理论推导出的自适应滤波算法源于对问题的统计描述。与之相反,最小二乘方法从确定性的观点来解决滤波器优化问题。如前所述,在Wiener滤波器理论中,理想滤波器是通过最小化MSE(即一个统计量)而获得的。另一方面,在最小二乘方法中,性能指标是给定数据的加权误差平方和,即一个确定量。该确定性方法的一个结果(第12章详细讨论其推导时将变得显而易见)是,基于最小二乘的算法在收敛速度上通常会比基于LMS的算法快得多。它们对输入信号的功率谱密度也不敏感。提高收敛性能需要付出的代价是更高的计算复杂性和更差的数字稳定性。

最小二乘问题的直接表述将得到其解的一个矩阵形式,这适用于分块输入信号的情形。该方法称为最小二乘方法的块估计,并在诸如语音信号的线性预测编码(LPC)等领域得到应用。然而,考虑到1.2节给出的原因,在自适应滤波器的情况下,每个输入样本到来之后更新滤波器系数的最小二乘方法的递推描述更受欢迎。主要存在三类RLS自适应滤波算法。

- 标准RLS算法。该算法的推导与来自于线性代数的一个著名结论矩阵求逆引理密切相关。结果,实现标准RLS算法所涉及的矩阵运算导致了正比于滤波器长度平方的计算复杂性。
- 基于QR分解的RLS(QRD-RLS)算法。RLS算法的这种形式所涉及的矩阵运算同样导致了其计算复杂性随滤波器长度的平方增长。但是,这里所涉及的运算使得它们可以归入一些称为脉动阵列的规则结构中。QRD-RLS算法的另一个重要特征是相对于其他类型RLS算法(Haykin, 1991, 1996)的对于数值误差的鲁棒性。
- 快速RLS算法。在横向滤波器情形下,各抽头输入为输入信号 $x(n)$ 的相邻样本(见图1.1)。快速RLS算法利用滤波器输入的这一属性,并以正比于滤波器长度的计算复杂性来解决最小二乘问题,故得名快速RLS。公认的有如下两类快速RLS算法。
 - RLS格型算法。这些格型算法包括阶递推和时间递推方程的运用。该特征的一个结果为它实现了模块化结构。这适于使用流水线技术的硬件实现。这些算法的另一个理想特征是它们的某些变形对于由计算中的有限字长带来的数值误差非常鲁棒。

- 快速横向 RLS 算法。在每次迭代的运算量方面，快速横向 RLS 算法并不比格型 RLS 算法复杂。但是，它面临数值不稳定问题。因此，需要细心对待，以防止出现实际中不希望的行为。

在本书中，我们用 7 个章节来介绍基于 LMS 的不同算法。但对于 RLS 算法的讨论却是相当有限的。第 12 章全面地介绍最小二乘方法的性质并给出标准 RLS 算法的一个推导过程。第 13 章给出与快速 RLS 算法的推导相关的基本结果和这些算法的一些例子。第 14 章讨论部分自适应滤波算法的跟踪性能。第 15 章到第 20 章就这些算法在不同领域中的应用进行讨论。

1.5 自适应滤波器的实数形式与复数形式

在一些实际应用中，存在滤波器的输入和期望信号均为复值的情形。一个很好的例子是数字数据传输，其中最广泛使用的信令技术是相移键控(PSK)和正交幅度调制(QAM)。在该应用中，基带信号包含两个独立的成分，它们分别为复值信号的实部和虚部。此外，在自适应滤波器的频域实现(第 8 章)和子带自适应滤波器(第 9 章)情形下，我们将处理复值信号(即使原始信号是实值的)。因此，我们发现存在自适应滤波算法必须以复值变量来描述的情形。

在本书中，为使表述尽量简单，大部分情况下，针对实值信号给出推导过程。但是，在必要的时候，同样会给出对复值形式的扩展。

1.6 应用

自适应滤波器本质上是一种自设计系统，它们可以调节自身以适应不同的环境。结果表明，在非常广泛的领域(如控制、通信、雷达和声呐信号处理，干扰抵消，有源噪声控制(ANC)，生物医疗工程等)中，均可发现自适应滤波器的应用。这些应用的一个共同特点是它们均包含了一个对输入信号进行滤波以匹配期望响应的过程。这一特点给这些应用带来相同的自适应滤波基本表述。滤波器参数通过对相关信号进行一系列测量，并将其应用于自适应滤波算法以使得滤波器输出与期望响应之间的差在统计或确定性意义上最小化来得到更新。在这种情况下，自适应滤波的应用可分为四种类型：建模、逆建模、线性预测和干扰抵消。本章剩下的部分将对这些应用作一综述。

1.6.1 建模

图 1.5 画出了自适应滤波器情形下的建模问题。其主要目的是估计被控对象 $G(z)$ 的模型参数 $W(z)$ 。在已知被控对象 $G(z)$ 的一些先验知识的基础上，我们首先选择一个具有一定数量可调参数的传递函数 $W(z)$ 。然后通过自适应滤波算法来选择 $W(z)$ 的参数，以使得设备的输出 $d(n)$ 与自适应滤波器输出 $y(n)$ 之间的差最小。

很容易想到的一个建模应用就是系统识别。在大多数现代控制系统中，我们需要对所控制的系统进行在线识别，并将结果应用于自校正调节器(STR)环路中，正如图 1.6 所示(例如，参见 Astrom and Wittenmark

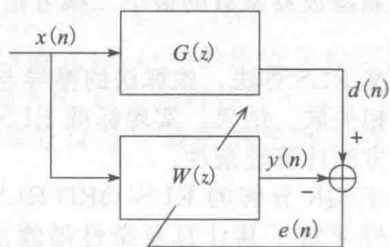


图 1.5 自适应系统建模

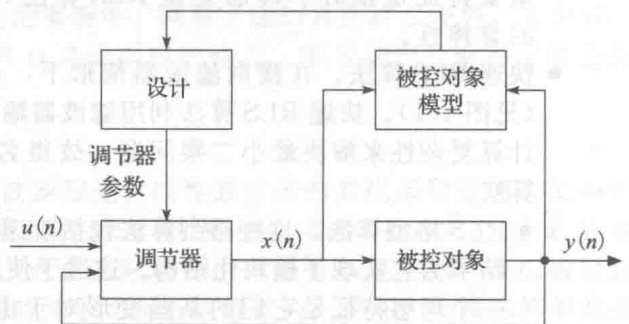


图 1.6 自校正调节器结构图