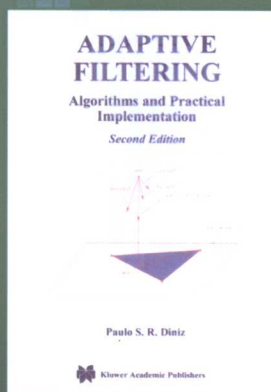


国外电子与通信教材系列

# 自适应滤波 算法与实现 (第二版)

Adaptive Filtering:  
Algorithms and Practical Implementation  
Second Edition



[英] Paulo S. R. Diniz 著  
刘郁林 景晓军 谭刚兵 等译  
杨义先 审校



Kluwer Academic  
Publishers



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

# 自适应滤波算法与实现

(第二版)

Adaptive Filtering:  
Algorithms and Practical Implementation  
Second Edition

[英] Paulo S. R. Diniz 著

刘郁林 景晓军 谭刚兵 等译

杨义先 审校

电子工业出版社  
Publishing House of Electronics Industry  
北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书简明地介绍了自适应滤波理论,以统一的形式包含了尽可能多的算法,避免了算法的重复和繁杂的符号表示。本书的指导思想是揭示出自适应滤波的坚实理论基础,重点讨论那些利用有限精度实现能够真正有效的算法。本书第二版在第一版的基础上,增加了非线性自适应滤波、子带自适应滤波、线性约束维纳滤波器、LMS算法在快速自适应实现中的行为分析以及仿射投影算法等全新的内容和研究成果。此外,作者还根据教学需要和读者要求,对书中部分内容进行了调整和优化。本书提供了大量的算法、例题、仿真结果和参考文献,以帮助读者深入理解书中内容。

本书的读者需要掌握数字信号处理和随机过程的一些基本原理。本书适合作为信号处理、通信、电路与系统、智能系统以及相关专业的高年级本科生和研究生教材,也适合作为相关专业研究人员的参考用书。

Copyright © 2002 Kluwer Academic Publishers.

Simplified Chinese language edition published by Publishing House of Electronics Industry, Copyright © 2004.

This edition is authorized for sale only in the People's Republic of China excluding Hong Kong, Macau and Taiwan.

本书中文专有翻译出版权由Kluwer Academic Publishers授予电子工业出版社。该专有出版权受法律保护。

未经许可,不得以任何形式或手段复制或抄袭本书内容。

此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区)发行与销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2003-0371

### 图书在版编目(CIP)数据

自适应滤波算法与实现(第二版)/(英)迪尼(Diniz, P. S. R.)著;刘郁林等译.

-北京:电子工业出版社,2004.7

(国外电子与通信教材系列)

书名原文:Adaptive Filtering: Algorithms and Practical Implementation, Second Edition

ISBN 7-5053-9918-7

I. 自… II. ①迪… ②刘… III. 自适应滤波-滤波理论-教材 IV. 0211.64

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第068820号

责任编辑:马岚 刘静

印刷:北京智力达印刷有限公司

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

经销:各地新华书店

开本:787×1092 1/16 印张:23.25 字数:595千字

印次:2004年7月第1次印刷

定价:39.00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。质量投诉请发邮件至zlt@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至dbqq@phei.com.cn。

## 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。



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<br>杨千里 | 北京邮电大学校长、教授、博士生导师<br>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   |
|     | <b>徐重阳</b> | 华中科技大学教授、博士生导师、电子科学与技术系主任<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        |
|     | 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   |

## 译者序

自适应滤波理论是统计信号处理领域中的一个重要组成部分。对于未知时变环境下的信号处理问题,自适应滤波器能够提供比传统固定滤波器更优的解决方法,并且还能提供其他方法所不具备的新的信号处理能力。因此,近 40 年来,自适应滤波理论在许多领域(如通信、控制、雷达、声呐、地震和生物医学工程等)获得了广泛应用。

本书的作者长期致力于自适应信号处理、模拟和数字信号处理、数字通信、无线通信、多采样率系统、随机过程、电子电路等领域的教学和研究工作,是国际上信号处理领域的知名学者。他曾在巴西里约热内卢联合大学、美国圣母玛利亚大学、加拿大维多利亚大学、芬兰赫尔辛基技术大学等许多学术机构和研究院所进行讲学。他根据讲授自适应信号处理课程的讲稿,结合多年的教学经验和学生的需求,专门针对大学高年级本科生、研究生和从事实际工作的工程师撰写了本书。

因此,本书与已往的有关自适应滤波理论的著作相比,在以下三个方面具有突出的特点。

第一,本书适合于作为教材,作者在有限的篇幅内系统精炼地阐明了自适应滤波的理论基础,深入探讨了大多数基本概念,给出了合适的例子并对实际应用进行了讨论。为了避免直接给出理论结果又不至于导致内容的重复,作者以统一的风格对算法进行了严格推导,便于教师在讲解与不同算法相关的符号和推导过程时,不至于花掉太多时间。因此,本书尤其适合于作为高年级本科生和研究生学习自适应信号处理和自适应滤波理论的教材。

第二,本书重点介绍了能有效实现的算法。在应用自适应滤波理论时常常面临一个问题,即在有限精度实现中,到底哪一个算法才能真正有效。因此,作者特别针对那些利用有限精度实现的、能真正有效的算法进行了重点讲解,在附录中还对量化效应进行了理论分析。这使得学生能够通过学习,尝试自适应滤波器的实现和研究。对于从事实际工作的工程师和科技人员来说,这也是非常有益的。

第三,本书内容新颖独特。本书作者具有多年的教学经验,他的许多观点都很有独创性。本书除了讨论自适应滤波的基本理论以外,还新增加了非线性自适应滤波、子带自适应滤波、线性约束维纳滤波器、LMS 算法在快速自适应实现中的特性分析以及仿射投影算法等全新的内容和研究成果。尤为突出的是,本书还专门用一章的篇幅对自适应 IIR 滤波器进行了深入讨论,这部分内容即使在许多经典著作中也很少涉及。

正因如此,本书自出版以来,就受到了读者的一致好评,现已作为世界上许多大学的教材。本书对于信号处理、通信、智能系统等领域的科研人员以及其他对自适应滤波理论感兴趣的人来说都很有参考价值。

本书第 1 章~第 8 章由刘郁林博士翻译,第 9 章和附录由景晓军博士翻译,第 10 章由谭刚兵博士翻译,第 11 章由李明奇博士翻译,全书由杨义先教授审校。重庆通信学院的郑鹏、王磊、沈英杰、黄磊、杨磊等硕士生和巫雪梅老师参与了译稿的整理工作。最后,还要特别感谢重庆通信学院的申志福教授和胡中豫教授所给予的大力支持。

由于译者水平有限,书中难免存在疏漏和不当之处,恳请广大读者和专家批评指正。

## 前 言

在最近 20 年中,数字信号处理技术取得了飞速发展,许多大学的本科生和研究生教学计划中都包括了“数字信号处理”这门课程,这与不断出现的实现数字信号处理算法的技术是密不可分的。数字信号处理技术的巨大发展,使得其中的某些研究方向已经独立出来,成为了新的领域。如果可以准确得到待处理信号的信息,则设计者就可以很容易地选择最合适的算法来对信号进行处理。如果待处理信号的统计特性是未知的,那么采用固定的算法就不能有效地处理信号。解决方法是采用自适应滤波器,这种滤波器可以通过其内部参数的最优化来自动改变其特征。自适应滤波算法在统计信号处理的许多应用中都是非常重要的。

30 多年以来,自适应信号处理一直都是研究的热点。但是,直到上世纪 80 年代,其研究和应用才取得了重大进展。其原因有两点,一是实现工具不断实用化,二是出现的早期教材系统地对该问题进行了阐述。最近,在自适应滤波领域,新的研究成果仍然不断涌现。线性自适应滤波理论已经趋于成熟,以至于可以用一本教材对相应的不同方法进行统一阐述,并强调那些可以较好地实现的算法。本书集中讨论了自适应算法。当可以得到环境中信号的一个新采样值时,算法就自适应地进行更新。本书还包括了只有在得到一个新的数据块时才自适应更新的所谓块算法,并用子带滤波框架对其进行了介绍。通常而言,块算法与在线算法相比,其实现所需的资源是不同的。基于高阶统计量的非线性自适应滤波理论和盲信号处理理论可能是本书内容的两个最重要的补充。这里没有对这两部分内容进行讨论,但如果能充分理解本书内容,对于这些仍然不断发展的领域的学习也是相当有帮助的。

当我在里约热内卢联合大学研究生院讲授自适应信号处理课程时,就萌发了撰写本书的念头。学生们要求我尽可能多地讲授算法,这使我开始思考如何来组织这个主题,以便在讲解与不同算法相关的符号和推导过程时,不至于花掉太多时间。另一个普遍存在的问题是,在有限精度实现中,到底哪一个算法才真正有效。这些问题使我得出一个结论,就是应当写一本关于这个主题的新教材,并时刻记住这些目标。此外,考虑到大多数本科生和研究生的教学计划只包括了自适应滤波课程,这本书也不应该太长。另一个需要实现的目标则是为从业的工程师提供了解有效算法的方便途径。

直到在加拿大的维多利亚大学进行了一年半的休假以后,我才真正开始写作本书。我利用业余时间开始慢慢进行写作。本书前面的部分章节是我在不同学校讲授自适应信号处理的短期课程时用过的内容,这些学校包括芬兰的赫尔辛基技术大学、西班牙的 Menendez Pelayo 大学以及加拿大维多利亚大学(维多利亚微型网络中心)。本书的其他部分则是根据我在里约热内卢联合大学研究生院为研究生讲授自适应信号处理课程时的讲稿修改而成的。

本书的指导思想是为读者提供坚实的理论基础,并避免直接给出推导结果和重复讲述某些内容。同时,我还力图将本书控制在适当的篇幅以内,而不会牺牲内容的清晰度,也不会省略某些重要的内容。本书的另一个目标是使读者达到可以尝试实现和开始进行研究的程度。在每章最后,都给出了许多参考文献,以帮助读者继续学习该部分内容。

本书的读者需要掌握数字信号处理和随机过程的一些基本原理,包括离散傅里叶变换和  $Z$  变换、FIR 和 IIR 数字滤波器的实现、多速率系统、随机变量和随机过程、一阶和二阶统计量、



矩以及随机信号的滤波等。如果读者具备这些方面的基础知识,我相信阅读本书是不成问题的。

本书第1章介绍了自适应滤波的基本概念,并为后续章节给出的所有方法提供了一个统一的框架。本章还简单介绍了自适应滤波的一些典型应用。

在第2章中,回顾了离散随机过程的基本概念,特别强调了那些对分析自适应滤波算法来说有用的结果。另外,本章还给出了维纳滤波器,构建了平稳环境下的最优线性滤波器。由于线性约束维纳滤波器在天线阵列信号处理中得到了广泛应用,我们也对其进行了讨论。本章给出了将约束最小化问题转化为非约束最小化问题的方法,然后介绍了均方误差曲面的概念(这是分析自适应滤波器的另一个有用的工具)。本章还简单介绍了经典的牛顿算法和最陡下降算法,应用这些算法需要知道随机环境的完整知识。本章的最后详细回顾了自适应滤波算法的实际应用。

第3章在一定程度上对LMS算法进行了分析。本章对几个方面(如在平稳和非平稳环境下的收敛性能等)进行了讨论。本章还包括了许多仿真举例,以说明LMS算法在不同情况下的性能。在附录A的A.1节中,讨论了LMS算法用定点数和浮点数实现时的量化效应问题。

第4章讨论了在某种程度上与LMS算法相关的一些算法,包括量化误差算法、LMS-Newton算法、归一化LMS算法、变换域算法以及仿射投影算法等。本章还讨论了这些算法的一些特性。

第5章介绍了传统的递归最小二乘(RLS)算法。该算法使某个确定性目标函数最小化,在这个意义上,它与最小均方(LMS)算法是不同的。与第3章的讨论方式相同,我们也对传统RLS算法的几个方面(如在平稳和非平稳环境下的收敛性能等)进行了讨论,也给出了一些仿真结果。在附录A的A.2节中,我们也讨论了这种算法的稳定性问题,以及用定点数和浮点数实现该算法时存在的量化效应问题。除了量化效应问题以外,本章所给出的一些结果,对后续章节中的RLS算法也是有效的。

在第6章中,介绍了一类基于FIR格型结构实现的快速RLS算法,包括非归一化算法、归一化算法和误差反馈算法等。这些算法可以代替传统的计算复杂度较高的RLS算法。

第7章介绍了快速横向RLS算法,由于计算复杂度很低,这种算法非常具有吸引力。然而,在实际实现中,这些算法可能会面临稳定性问题。因此,我们特别强调了一种稳定快速横向RLS算法。

第8章介绍了一类基于QR分解的RLS算法,并给出了这类算法的传统形式和快速实现形式。

第9章讨论了利用IIR数字滤波器实现自适应滤波的问题,包括如何计算梯度以及如何导出自适应算法等内容。作为对利用直接形式实现的IIR自适应滤波器的替代,我们还给出了利用级联结构、并行结构和格型结构实现的IIR自适应滤波器。同时,还讨论了IIR自适应滤波器的均方误差曲面的性能。此外,本章还介绍了基于其他误差表达式的算法,如基于方程误差和Steiglitz-McBride方法的算法。

第10章讨论了非线性自适应滤波问题,利用非线性结构来完成自适应滤波。其出发点在于利用非线性自适应滤波结构来更好地模拟某些非线性现象,在通信应用中这些非线性现象(如发射端功率放大器的非线性特征等)常常出现。特别地,我们介绍了Volterra级数LMS算法、RLS算法和基于双线性滤波器的自适应算法。另外,我们还简单介绍了一些基于神经网络

概念的非线性自适应滤波算法,即多层感知算法和 RBF 算法。本章还包括了判决反馈均衡 (DFE)的一些例子。

第 11 章介绍的子带自适应滤波主要针对所需的自适应滤波器阶数较高的场合。例如,在语音回波消除的应用中,未知的系统(回波)模型就具有很长的冲激响应。在子带自适应滤波问题中,信号被分析滤波器组在频域子带中进行了分割。本章还简单回顾了多速率系统的有关知识,给出了子带自适应滤波的基本结构。同时,还介绍了无延迟子带自适应滤波的概念,此时的自适应滤波系数在子带中进行更新,并被映射到一个等效的全频带滤波器。本章还对子带滤波算法和块自适应(也称为频域自适应滤波器)算法的关系进行了讨论。

在本书中,我利用了一些标准的例子来进行仿真,以对不同算法的仿真结果进行验证和比较。这样,不仅避免了频繁的重复,而且还使读者容易比较各种方法的性能。

本书第二版与第一版相比,有以下一些不同点。新版包括了非线性自适应滤波和子带自适应滤波两章内容。在第 3 章中讨论了与 LMS 算法快速自适应实现相关的问题和线性约束 LMS 算法。在第 4 章中包括了仿射投影算法。此外,我还将 LMS 算法和传统 RLS 算法的量化效应分析从正文移到了书末的附录中。第二版在修改过程中,还根据学生们的建议,对许多推导过程进行了优化和改进。

在三学期的教学计划中,我通常先讲授第 1 章到第 5 章,以及附录 A 中的量化效应分析的内容,有时可以跳过第 2 章的部分内容。在剩余时间里,我尽可能多地讲授余下章节的内容,通常还会征求学生们的意见,了解他们想学习哪些部分的内容。本书也可以作为自学教材,读者可以阅读第 1 章到 5 章,如果不需要了解具体实现,还可以忽略附录 A,这样是不会影响全书连贯性的。除了第 7 章要求先具备第 6 章的知识以外,其他章节均自成体系。

# 目 录

<b>第 1 章 自适应滤波导论</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 自适应信号处理 .....	2
1.3 自适应算法介绍 .....	3
1.4 应用 .....	5
参考文献 .....	7
<b>第 2 章 自适应滤波基础</b> .....	9
2.1 引言 .....	9
2.2 信号表示 .....	9
2.3 相关矩阵 .....	16
2.4 维纳滤波器 .....	24
2.5 线性约束维纳滤波器 .....	26
2.6 均方误差曲面 .....	29
2.7 偏差和一致性 .....	31
2.8 牛顿算法 .....	31
2.9 最陡下降算法 .....	32
2.10 应用回顾 .....	35
2.11 结束语 .....	42
参考文献 .....	42
习题 .....	45
<b>第 3 章 最小均方算法</b> .....	48
3.1 引言 .....	48
3.2 LMS 算法 .....	48
3.3 LMS 算法的一些特性 .....	50
3.4 非平稳环境下的 LMS 算法特性 .....	58
3.5 举例 .....	62
3.6 结束语 .....	81
参考文献 .....	81
习题 .....	83
<b>第 4 章 基于 LMS 的算法</b> .....	87
4.1 引言 .....	87

4.2	量化误差算法	87
4.3	LMS-Newton 算法	96
4.4	归一化 LMS 算法	98
4.5	变换域 LMS 算法	99
4.6	仿射投影算法	105
4.7	仿真举例	107
4.8	结束语	114
	参考文献	115
	习题	118
<b>第 5 章</b>	<b>传统 RLS 自适应滤波器</b>	<b>121</b>
5.1	引言	121
5.2	RLS 算法	121
5.3	最小二乘解的特性	124
5.4	在非平稳环境下的特性	135
5.5	仿真举例	138
5.6	结束语	141
	参考文献	142
	习题	143
<b>第 6 章</b>	<b>自适应格型 RLS 算法</b>	<b>145</b>
6.1	引言	145
6.2	递归最小二乘预测	145
6.3	阶数更新方程	150
6.4	时间更新方程	154
6.5	联合过程估计	160
6.6	最小二乘误差的时间递推	163
6.7	归一化格型 RLS 算法	164
6.8	误差反馈格型 RLS 算法	168
6.9	基于先验误差的格型 RLS 算法	170
6.10	量化效应	172
6.11	结束语	175
	参考文献	176
	习题	177
<b>第 7 章</b>	<b>快速横向 RLS 算法</b>	<b>179</b>
7.1	引言	179
7.2	递归最小二乘预测	179
7.3	联合过程估计	182
7.4	稳定快速横向 RLS 算法	183
7.5	结束语	188

参考文献	189
习题	190
<b>第 8 章 基于 QR 分解的 RLS 滤波器</b>	<b>192</b>
8.1 引言	192
8.2 利用 QR 分解实现对角化	192
8.3 脉动阵实现	203
8.4 一些实现问题	208
8.5 快速 QR-RLS 算法	209
8.6 结束语	219
参考文献	220
习题	222
<b>第 9 章 自适应 IIR 滤波器</b>	<b>227</b>
9.1 引言	227
9.2 输出误差 IIR 滤波器	227
9.3 导数的一般实现方法	231
9.4 自适应算法	233
9.5 其他自适应滤波器结构	236
9.6 均方误差曲面	248
9.7 滤波器结构对 MSE 曲面的影响	253
9.8 其他误差表示法	255
9.9 结束语	260
参考文献	261
习题	265
<b>第 10 章 非线性自适应滤波</b>	<b>268</b>
10.1 引言	268
10.2 Volterra 级数算法	268
10.3 自适应双线性滤波器	279
10.4 多层感知算法	283
10.5 径向基函数算法	287
10.6 结束语	293
参考文献	294
习题	296
<b>第 11 章 子带自适应滤波器</b>	<b>297</b>
11.1 引言	297
11.2 多速率系统	297
11.3 滤波器组	300
11.4 子带自适应滤波器	305

11.5 交叉滤波器的消除 .....	313
11.6 无延迟子带自适应滤波 .....	317
11.7 频域自适应滤波 .....	323
11.8 小结 .....	328
参考文献 .....	329
习题 .....	332
<b>附录 A LMS 算法和 RLS 算法的量化效应 .....</b>	<b>334</b>
A.1 LMS 算法的量化效应 .....	334
A.2 RLS 算法的量化效应 .....	342
参考文献 .....	354

# 第 1 章 自适应滤波导论

## 1.1 引言

在这一节中,将要介绍本书所讨论的信号处理系统。

在过去的 30 年中,信号处理技术获得了巨大发展。数字电路设计技术的进步,是促使人们对数字信号处理领域越来越感兴趣的关键技术原因。相应的数字信号处理系统之所以具有吸引力,是因为它具有可靠性好、精度高、体积小以及灵活性强等特点。

数字信号处理系统的一个例子是滤波。滤波是一种信号处理操作,其目的是为了处理某个信号,以便利用信号中所包含的信息。换句话说,滤波器是一个器件,它将输入信号映射为输出信号,以便提取出输入信号中所包含的期望信息。数字滤波器是处理用数字形式表示的离散时间信号的滤波器。对于时不变滤波器而言,其内部参数和结构都是固定的,而如果滤波器是线性的,则其输出信号是输入信号的线性函数。一旦预先给定了滤波器的设计规范,则时不变线性滤波器的设计过程包括三个基本步骤,即利用有理传输函数对规范做近似,选取适合于算法的相应结构,以及选取算法的实现形式等。

当固定的设计规范是未知的,或者采用时不变滤波器不能满足设计规范时,就需要采用自适应滤波器。严格地讲,自适应滤波器是一种非线性滤波器(因为其特征取决于输入信号),因此不满足齐次性和叠加性条件。然而,如果在某个给定的时刻固定滤波器参数,则其输出信号是输入信号的线性函数。从这个意义上讲,除第 10 章所讨论的自适应滤波器以外,本书所讨论的大多数自适应滤波器都是线性的。

自适应滤波器是时变滤波器,因为其参数在不断变化以满足某个性能要求。从这个意义上讲,可以将自适应滤波器解释为用在线方式完成近似步骤的一种滤波器。在通常情况下,定义性能准则要求有一个参考信号,该参考信号通常隐含在设计固定滤波器的近似步骤中。这种说法让人觉得,在设计固定(非自适应)滤波器的过程中,需要知道输入信号和参考信号的完全特征,才能设计出满足一定性能的最合适的滤波器。然而,在实际中通常不会遇到这种情形,因为实际环境不是很明确的。组成环境的信号是输入信号和参考信号,对于这两者都不太明确的情况,采用的设计方法是首先对信号进行建模,然后再设计滤波器。这种方法不仅复杂度很高,而且很难用在线方式实现。对这个问题的解决办法是采用一个自适应滤波器,该滤波器只利用环境中的可用信息,通过一个相当简单的算法在线更新其参数。换句话说,自适应滤波器完成了数据驱动的近似步骤。

本书的主题是自适应滤波,主要讨论对于一个参数(或者系数)能自适应变化的滤波器,为了提高预先确定的性能准则,应如何选择其结构和算法。系数的更新是利用某个给定时刻的可用信息来完成的。

随着数字超大规模集成(VLSI, very large scale integration)技术的发展,自适应信号处理技术在许多领域得到了广泛应用。这就是本书只考虑自适应滤波器的离散时间实现的原因。当然,我们假设从现实中获取的连续时间信号是用离散时间信号来表示的,即以大于其最高频率

的两倍的采样率对其进行了合适的采样。一般而言,当通过一个连续时间信号进行采样来产生离散时间信号时,都假设满足奈奎斯特定理或者采样定理[1]~[9]。

## 1.2 自适应信号处理

正如前面所讨论的,设计固定系数的数字滤波器要求很明确的设计规范。然而,在某些情况下,设计规范是未知或时变的。其解决办法是采用具有自适应系数的数字滤波器(称为自适应滤波器[10]~[17])。

由于不能得到设计规范,因此,在决定滤波器系数更新的自适应算法中,需要一些其他的信息,这些信息通常是以信号的形式给出的。该信号通常称为期望信号或者参考信号,对该信号的选择取决于具体应用,且具有一定的技巧性。

由于自适应滤波器被认为是非线性系统,因此其特性分析比固定滤波器更加复杂。另一方面,由于自适应滤波器是一种自适应滤波器,因此从设计人员的观点来看,其设计比固定滤波器的设计更加简单。

在图 1.1 中,给出了自适应滤波的一般情形。其中, $k$  为迭代次数, $x(k)$  表示输入信号, $y(k)$  为自适应滤波器输出信号, $d(k)$  定义了期望信号。误差信号  $e(k)$  可以根据  $d(k) - y(k)$  计算得出。然后,为了确定滤波器系数的适当更新方式,利用误差信号构造一个自适应算法所需的性能函数(或者目标函数)。目标函数的最小化意味着在某种意义上,自适应滤波器的输出信号与期望信号实现了匹配。

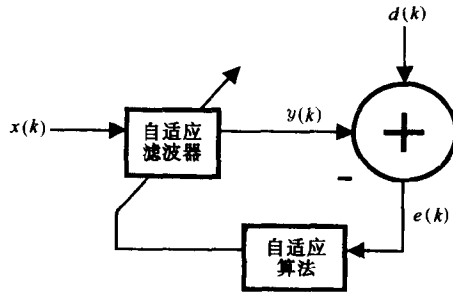


图 1.1 一般自适应滤波器结构

正如图 1.1 中所示,一个自适应滤波器的完整规范是由如下三项所组成的:

- 1) **应用:**在过去 10 年中,自适应技术在更多的应用场合(比如回波消除、色散信道的均衡、系统辨识、信号增强、自适应波束形成、噪声消除以及控制领域等[14]~[19])取得了成功。研究自适应滤波器的各种应用不是本书主要讨论的范畴。然而,本书也会简单考虑一些应用例子。
- 2) **自适应滤波器结构:**自适应滤波器可以用许多不同结构来实现。结构的选取会影响到处理的计算复杂度(即每次迭代的算术操作数目),还会对达到期望性能标准所需的迭代次数产生影响。从根本上讲,主要有两类自适应数字滤波器结构(这是根据其冲激响应的形式来划分的),即有限长冲激响应(FIR, finite-duration impulse response)滤波器和无限长冲激响应(IIR, infinite-duration impulse response)滤波器。FIR 滤波器通常利用



非递归结构来实现,而 IIR 滤波器则利用递归结构来实现。

- 自适应 FIR 滤波器结构:应用最广泛的自适应 FIR 滤波器结构是横向滤波器,也称为抽头延迟线,它利用正规直接形式实现全零点传输函数,而不采用反馈环节。对于这种结构,输出信号 $y(k)$ 是滤波器系数的线性组合,它产生具有惟一最优解的二次均方误差函数( $MSE = E[|e(k)|^2]$ )。为了得到相对于横向滤波器结构来说更好的性能(这些性能是用计算复杂度、收敛速度和有限字长特性等来描述的),本书后面也会讨论其他一些自适应 FIR 结构。
  - 自适应 IIR 滤波器结构:自适应 IIR 滤波器采用得最多的结构是标准直接形式结构[5],因为它的实现和分析都很简单。然而,采用递归自适应滤波器会存在一些内在的问题(这些问题是由结构决定的,比如要求对极点的稳定性进行监视),而且收敛速度很慢。为了克服这些问题,人们提出了不同的结构形式。在这些结构中,本书考虑了级联结构、格型结构和并行结构等,因为它们具有一些特殊的性质,这将在第9章专门进行讨论。
- 3) 算法:算法是为了使某个预先确定的准则达到最小化,而自适应地调整滤波器系数的方法。算法是通过定义搜索方法(或者最小化算法)、目标函数和误差信号的特性来确定的。算法的选择决定了整个自适应过程的几个重要因素,如次优解的存在性、有偏最优解和计算复杂度等。

### 1.3 自适应算法介绍

自适应滤波器的基本目标,是以某种方式调整其参数 $\theta(k)$ ,让滤波器的输出尽可能使包含参考信号的某个特定的目标函数最小化。通常而言,目标函数 $F$ 是输入信号、参考信号和自适应滤波器输出信号的一个函数,即 $F = F[x(k), d(k), y(k)]$ 。目标函数的正确定义必须满足如下两个特性:

- 非负性:对于任意 $y(k), x(k)$ 和 $d(k)$ ,都有 $F[x(k), d(k), y(k)] \geq 0$ 。
- 最优性: $F[x(k), d(k), d(k)] = 0$ 。

在自适应过程中,自适应算法试图使函数 $F$ 最小化,从而使得 $y(k)$ 与 $d(k)$ 近似相等, $\theta(k)$ 收敛到 $\theta_0$ ,其中 $\theta_0$ 为导致目标函数最小化的最优系数构成的集合。

解释目标函数的另一种方式,是将其视为某个普通误差信号 $e(k)$ 的直接函数,而该误差信号又是信号 $x(k), y(k)$ 和 $d(k)$ 的某个函数,即 $F = F[e(k)] = F[e(x(k), y(k), d(k))]$ 。利用这种结构,我们可以认为一个自适应算法是由三个基本要素构成的:最小化算法的定义、目标函数形式的定义和误差信号的定义。下面讨论这些问题。

- 1) 对函数 $F$ 最小化算法的定义:这是最优化理论[21]的主题,它会从本质上影响自适应过程的收敛速度和计算复杂度。在自适应信号处理领域中,应用得最普遍的最优化方法有以下几种。

- 牛顿方法:该方法寻找目标函数的二阶近似的最小值,其参数向量的迭代更新公式为