

自适应信号处理

[美] B·维德罗 著
S·D·史蒂恩斯

● 王永德 龙宪惠 译校

四川大学出版社

TN911.7
W52

3844

自适应信号处理

[美] B.维德罗 著
S.D.史蒂恩斯
王永德 龙宪惠 译

四川大学出版社

1991年·成都

(川) 新登字014号

内 容 简 介

本书是系统地介绍自适应信号处理的一本专业性教科书。主要内容包括自适应系统的原理、算法、结构、以及在各种领域的应用。全书侧重讨论线性组合器这种基本的结构形式与LMS(最小均方)算法这种重要而基本的算法。应用方面重点讨论了自适应信号处理在系统辨识、解卷积、信道均衡、控制、干扰抵消以及阵列处理等方面的应用。该书的特点是由浅入深、系统性强、概念清楚、论述严谨,且在每章末均附有大量带启发性的习题和部分习题答案,以及大量的参考文献。该书还触及本领域的最新研究动态。

本书可供从事通信、雷达、声纳以及信号处理有关领域的高校教师、研究生、高年级大学生以及科技工作者阅读。

B. Widrow S. D. Stearns

ADAPTIVE SIGNAL PROCESSING

Prentice-Hall, Inc. 1985

自 适 应 信 号 处 理

[美] B·维德罗 著
S. D. 史蒂恩斯

王永德 龙宪惠 译

责任编辑 杨守智

封面设计 蒋仲文

四川大学出版社出版发行(四川大学内)
四川省新华书店经销 四川省郫县犀浦印刷厂印刷

开本: 787×1092毫米1/16 印张: 25.25 字数: 510千

1989年11月第一版 1991年9月第二次印刷

印刷: 1401—3400册

ISBN 7—5614—0192—2/TB·5 定价: 7.80元

序 言

本书是笔者在自适应信号处理领域将近三十年的教学与科学研究活动的产物。它主要是作为自适应信号处理的基础性教科书而撰写的。可以相信，当它出版时，它仍是这个主题仅有的一本基础性教程，或者至少在目录表所概括的主题材料的广度上是唯一的一本教科书。

本书是作者在斯坦福大学、新墨西哥大学、桑比亚国家实验室有关自适应信号处理课程高年级或研究生一二学期的授课讲稿基础上整理而成。除了第一章外每章末均有习题，我们认为这是采用本书作为教材的重要部分，这些习题常常是用来让读者更加透彻地理解基本概念或者提出一些与正文中基本想法不同的应用。

由本书目录读者可以看到，此书划分为四个主要部分。前三部分为导论，平稳信号的自适应理论和自适应算法与结构。它们占据全书正文近一半的篇幅。这部分内容属基本理论，它是任何有关自适应信号处理入门课程均应具备的基础知识。第四部分，即应用篇，由有关自适应信号处理于各种工程应用所概括成的六章所组成。对这部分内容教员可以把重点放在一些特别有兴趣的主题上。然而，即使将它作为一学期的课程，也可把每一章的第一节作为讲授的重点。

学习本门课程的学生至少应有工程与教学类高等专科学校以上的学历，并具有编写与运行计算机程序的能力。后面的要求对完成本书的某些习题来讲是重要的。有关线性系统分析，特别是用 Z 变换分析离散系统的课程是非常有用的（即使不是必不可少的）基础。同时，具有工程应用统计与概率或相类似的课程也对学习本书提供了有用的基础。

在第一篇中，第一章作为在工程上某些系统的特征或性质引入了自适应的概念，第二章介绍了自适应线性组合器，它是一种最简单，也是最广泛使用的自适应结构。在这章中还描述了几何空间的“性能表面”，它对分析任何自适应系统都是有用的。

第二篇平稳信号的自适应理论，包括了性能表面与其性质的分析，这种分析始于第三章。第四章中自适应过程被视为对性能表面最小点的搜索过程。第五章包含了性能表面梯度估值的统计分析以及几种搜索方法的比较等内容。

在第三篇自适应算法与结构中，第六章引出并讨论了最小均方算法。第七章介绍了学习本书以下各章所需要的信号处理的基本概念，它包括了联系时域与频域的 Z 变换关系。本篇的最后一章，即第八章介绍了LMS算法以外的其它算法；以及线性组合器以外的其它自适应结构，例如自适应格型结构。在编写本书时，格型结构是一个发展得十分迅速的领域，因而这里的介绍并不像我们所希望的那样全面。

最后一篇即第四章复盖了自适应信号处理的主要应用领域。当学完了一——八章的基础之后，可以有选择地从第四篇中学习一些课题。第九、十两章介绍了对未知系统的自适应直接的或逆的模拟以及在多径通信，地球物理勘探，数字滤波器设计以及电话信道

均衡等方面的应用。自适应控制系统在第十一章介绍。第十二章讨论了自适干扰对消，并给出了几个应用举例。第十三章与第十四章包括了自适应阵及波束形成器等内容。

当撰写这本书时，我们收到来自许多天才的同行们的批评、评论与建议，真是受益匪浅。我们十分珍惜这些评论与意见，并通过这项工作增进了彼此的友谊，对此我们深表感谢。在这里要致谢以下学者，他们是Robert D. Fraser, Dennis R. Morgan, Doe H. Youn, Eugene Walach, Richard Gooch, Ruth, Etter, Edward S. Angel, Llogd J. Griffiths, Nasir Ahmed, John R. Treichler, C. Richard Johnson, Jr., Michael G. Larimore, Glenn R. Elliott, John M. Mc Cool, John M. Cioffi, and T. C. Hsia。没有这些亲密朋友们的帮助与贡献，这本书不可能像现在这个样子。

我们也要感谢学习过上述自适应信号处理课程的所有学生。事实上他们校订，修改了这本书，这是我们力所不及的。对他们的耐心、兴趣和热忱在此深表感谢。

最后还要感谢桑地亚国家实验室的 Dedra Shepperd 女士和斯坦福大学的 Miekoparker 女士，她们坚持不懈地，以极大的耐心反复打印了这本书的书稿。

B. 维德罗

S. D. 史蒂恩斯

前 言

本书是一本有关自适应信号处理学科的专业性教科书，原版是1985年在美国出版的。作者B·Widrow是自适应信号处理的鼻祖。全书内容由浅入深、条理清楚、层次分明，篇章安排较为科学；每章末附有大量的习题，以便于初学者加深对内容的消化，部分习题给出答案便于自学者检查。因而它是有志于学习、掌握或应用自适应信号处理这门新学科的一本难得的好书。

本书前三篇为基础篇。第四篇为应用篇，该篇内容十分丰富，它包括了作者本人在内的一些最新的研究成果与研究动向。加上章末所附大量启发性的习题与参考文献，无疑对已熟悉这门学科，打算在该领域进一步深造并从事应用研究的理论与实际工作者也是有所裨益的。

本书的第十一、十二、两章由龙宪惠翻译，其余各章由王永德翻译并负责全书的校订。在翻译过程中，对原文中明显的错误与不妥之处作了订正。

在本书的翻译过程中，承蒙成都电子科技大学肖先赐教授指教，并提出有价值的建议，使译者获益良多，同时在百忙中对全书译稿进行了审阅，在此深表感谢。

由于译者水平有限，难免有不当之处，敬请读者不吝赐教。

译 者

1989.6.

常用符号

符号	在本书中的应用
a	(1) 在线性滤波器中的前馈权 (2) 在遗传优化算法中的码位
b	(1) 在线性滤波器中的递归权 (2) 在遗传优化算法中的码位
c	(1) 被控系统输出信号 (2) 信号传播速度
d	(1) 期待效应 (2) 天线单元间隔
e	自然对数的底2.71828……
$f(\)$	连续函数
g	被控系统的输出信号
h	冲激响应
j	$\sqrt{-1}$
k	样本数
l	(1) 权数 (2) 单元间隔
n	(1) 通用指标 (2) 噪声样值
p	输入白噪声总功率
r	(1) 梯度搜索算法收敛率 (2) 在(0.1)区间的均匀分布随机数 (3) 参考输入信号
s	(1) 格型滤波器中的信号 (2) 输入信号
t	连继时间
u	(1) Z的逆 (2) 被控系统输入信号
v	平移权 $W - W^*$
v'	主轴坐标系中的权值
w	权值
x	输入信号
y	输出信号
z	z变换中的变量

z^{-1}	z 的逆(单位延时)
A	(1) a 的 z 变换 (2) 振幅增益
B	b 的 Z 变换
C	(1) 格型变换中所用的函数 (2) 恒值信号振幅
D	信号畸变
$E [\]$	期望(均值、平均值)
F	传输函数
G	传输函数
H	传输函数
I	单位阵, $\text{diag} [1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1]$
J	(1) 传输函数 (2) 干扰信号
K	波束形成器单元数
L	最后一个滤波权的指标
M	(1) 失调 (2) 反馈权数
N	(1) 每个周期的样元数 (2) 从扰动后的权值取得的误差样本数 (3) 离散频率
N	梯度噪声, $\hat{\nabla} - \nabla$
N'	在主轴坐标系中的 N
P	(1) 由微商测量引起的扰动 (2) 估计的信号功率 (3) 被控系统的传输函数
P	输入与期待信号之间的相关向量
PS	伪滤波器的传输函数
Q	滤波器品质因素
Q	(1) R 的特征向量矩阵 (2) 与 R 矩阵估值成比例的矩阵
R	输入 X 的相关矩阵
S	(1) 用在SER算法中的矩阵 (2) 自适应阵中的信号向量
T	(1) 向量或矩阵的转置 (2) 样本之间以秒计的时间步长
T	自适应时间常数
U	增广信号向量

V	平移后的权向量, $W - W^*$
V'	在主轴坐标系中的权向量
W	权向量
X	x 的 z 变换
X	输入信号的向量
Y	y 的 z 变换
$Z^{-1} [\]$	逆 z 变换
α	(1) 指数衰减常数 (2) 输出信号的微商 (3) 在SER和格型算法中的遗忘因子
α_r	e_n 的 α 阶矩
$\hat{\alpha}_r$	α_r 的估值
β	(1) 输出信号微商 (2) 可调增益因子
γ	(1) 性能损失 (2) 泄漏因子
δ	(1) 在权值上的小扰动 (2) 平移后格型滤波器权 (3) 波束控制延迟
ϵ, ϵ	误差信号
κ	格型滤波器权
λ	(1) 特征值 (2) 波长
μ	在梯度搜索算法中的收敛参数
ν	(1) 收敛参数 (2) 格型滤波器权
ν^2	输入噪声功率
ξ	均方误差 (MSE) 性能函数
$\hat{\xi}$	ξ 的估值
π	3.14159265...
ρ	信噪比
σ^2	信号方差或功率
τ	权收敛的时间常数
ϕ	(1) 随机信号平均功率 (2) 相关函数
ω	以弧度计的角频率 (取样频率 = 2π)
Δ	延时量

- ⊖ 相角 (弧度)
- θ 信号到达角
- Λ 特征值矩阵, $\text{diag} [\lambda_0 \lambda_1 \dots \lambda_r]$
- Φ 功率谱密度 (的Z变换 ϕ)
- Ψ
 - (1) 输入信号
 - (2) 信号到达角
- Ω 以弧度/秒计的角频率 (取样频率 = $2\pi/T$)
- 表示最佳值, 如 W^*
- ▽ 性能函数的梯度向量
- ▽ 的估值

目 录

第一篇 导 论

第一篇的研究对象

第一章 自适应系统	(1)
1.1 定义与特征.....	(1)
1.2 应用领域.....	(2)
1.3 一般性质.....	(2)
1.4 开环与闭环自适应.....	(3)
1.5 闭环自适应的应用.....	(5)
1.6 自适应系统举例.....	(7)
1.7 章节内容概述.....	(8)
第二章 自适应线性组合器	(9)
2.1 引论.....	(9)
2.2 输入信号与权向量.....	(9)
2.3 期待响应与误差.....	(11)
2.4 性能函数.....	(12)
2.5 梯度与最小均方误差.....	(14)
2.6 性能表面的例子.....	(14)
2.7 梯度的另一种表示法.....	(16)
2.8 误差与输入分量的去相关.....	(17)
习题.....	(18)

第二篇 平稳信号自适应理论

第二篇的研究对象

第三章 二次型性能表面的性质

3.1 输入相关矩阵的正则形式.....	(23)
3.2 输入相关矩阵的特征值与特征向量.....	(24)

3.3 两个权的例子	(25)
3.4 特征向量与特征值的几何意义	(27)
3.5 第二个例子	(29)
习题	(31)
第四章 性能表面的搜索	(34)
4.1 性能表面的搜索方法	(34)
4.2 梯度搜索法的基本思想	(34)
4.3 一个简单的梯度搜索算法与它的解	(35)
4.4 稳定性与收敛率	(36)
4.5 学习曲线	(37)
4.6 牛顿法梯度搜索	(38)
4.7 多维空间的牛顿法	(41)
4.8 最速下降法梯度搜索	(42)
4.9 学习曲线的比较	(46)
习题	(48)
第五章 梯度估值及其对自适应过程的影响	(50)
5.1 用微商法估计梯度分量	(50)
5.2 性能损失	(51)
5.3 多权系统的微商测量与性能损失	(52)
5.4 梯度估值的方差	(54)
5.5 权向量解的影响	(57)
5.6 超量均方误差与时间常数	(61)
5.7 失调	(67)
5.8 牛顿法与最速下降法性能的比较	(69)
5.9 总失调及其它一些实际考虑	(70)
习题	(71)

第三篇 自适应算法与结构

第三篇的研究对象

第六章 LMS 算法	(75)
6.1 LMS算法的导出	(75)
6.2 权向量的收敛	(76)
6.3 收敛性的例子	(78)

6.4 学习曲线	(81)
6.5 权向量解的噪声	(83)
6.6 失调	(84)
6.7 性能	(85)
习题	(87)
第七章 自适应信号处理中的Z变换	(90)
7.1 Z变换	(90)
7.2 左序列与右序列	(91)
7.3 传输函数	(92)
7.4 频率响应	(93)
7.5 冲激响应与稳定性	(96)
7.6 逆Z变换	(97)
7.7 相关函数与功率谱	(99)
7.8 性能函数	(102)
7.9 性能表面举例	(103)
习题	(106)
第八章 其它自适应算法与结构	(109)
8.1 一种理想法——LMS/Newton算法	(109)
8.2 LMS/Newton算法的特性	(112)
8.3 序贯回归算法	(114)
8.4 自适应递归滤波器	(119)
8.5 随机搜索算法	(125)
8.6 格型结构	(127)
8.7 自适应格型预测器	(134)
8.8 用正交算法的自适应滤波	(142)
习题	(145)

第四篇 自适应信号处理的应用

第四篇的研究对象

第九章 自适应模拟与系统辨识	(153)
9.1 概述	(153)
9.2 多径通信信道的自适应模拟	(157)
9.3 在地球物理勘探中的自适应模拟	(163)

9.4 FIR 滤波器综合的自适应模拟	(165)
习题	(175)
第十章 自适应逆模拟, 均衡与解卷积	(180)
10.1 逆模拟的一般描述	(180)
10.2 某些理论例子	(184)
10.3 电话信道的自适应均衡	(190)
10.4 IIR 滤波器综合的零极点配置	(195)
习题	(207)
第十一章 自适应控制系统	(212)
11.1 自适应模型控制	(213)
11.2 自适应逆控制	(219)
11.3 自适应逆控制的例子	(224)
11.4 被控系统噪声及过滤后 x -LMS 算法	(227)
11.5 应用过滤后 x -LMS 算法的逆控制	(230)
11.6 参考模型控制	(231)
习题	(235)
第十二章 自适应干扰对消	(238)
12.1 自适应干扰对消的早期工作	(238)
12.2 自适应噪声对消的原理	(239)
12.3 平稳噪声对消解	(241)
12.4 参考输入中信号分量的影响	(245)
12.5 当作凹口滤波器的自适应干扰对消器	(249)
12.6 当作高通滤波器的自适应干扰对消器	(254)
12.7 有限长度和因果性的影响	(255)
12.8 多参考噪声对消	(257)
12.9 心电图 60 赫兹干扰的对消	(259)
12.10 心脏移植心电图移植心脏干扰的对消	(261)
12.11 胎儿心电图母体心电图的对消	(263)
12.12 语音信号中的噪声对消	(265)
12.13 长话电话线路中的回声对消	(267)
12.14 天线旁瓣干扰的对消	(272)
12.15 用自适应预测器对消周期干扰	(274)
12.16 自适应自调谐滤波器	(276)
12.17 自适应谱线增强器	(278)
12.18 结论	(283)

习题	(284)
第十三章 自适应阵与自适应波束形成导论	(290)
13.1 旁瓣对消	(290)
13.2 采用引导信号的波束形成	(302)
13.3 空间配置	(307)
13.4 自适应算法	(309)
13.5 窄带实验	(311)
13.6 宽带实验	(315)
习题	(319)
第十四章 自适应波束形成器的分析	(324)
14.1 接收阵的性能特征	(324)
14.2 格里菲思 LMS 波束形成器	(326)
14.3 弗罗斯特自适应波束形成器	(328)
14.4 具有零点与极点的自适应波束形成器	(333)
14.5 信号的对消与畸变	(339)
14.6 跳频扩谱技术	(349)
14.7 超分辨波束形成	(352)
习题	(360)
附录A 可移植的随机数发生器	(363)
索引	(371)

第一章 自适应系统

1.1 定义与特征

在《Random House》字典中对自适应(adapt)有如下注释:动词, 1.去适合某些需要或某些条件; 调整或修正去拟合……; 2.对不同的条件或环境等去调节自身。

近年来,“自适应系统”是一个日益增长的研究领域。已经研究出一大类在某种有限的意义下类似于有生命系统与生物适应过程的自适应自动机。同样,参照《Random House》字典,对名词“自适应”(“adaptaion”)赋予更多的意义:

1. 适应性动作。2. 被适应的状态; 调整。3. 生物学: (1)生物体或它的某些部分的结构或功能经自然选择发生改变以更好地适应环境而生存与繁殖。(2)一种组织或构造的修改以适合环境的变化。5. 生理学: 感觉器件, 如视觉、触觉、冷热、味觉、听觉与痛觉反应减弱以不断地去适应变化了的环境条件。6. 眼科: 瞳孔调节进入眼睛光通量的大小。7. 社会学: 人或社会团体受周围环境文化的影响的一种缓慢的潜移默化。

上述定义原来主要用以说明生物体对环境的自适应。同样的定义将推广至人工或人造的自适应系统,而这种系统正是本书讨论的中心。

自适应自动机是一种结构可以改变或调整的系统,而且这种改变与调整是通过系统本身与外界环境的接触来改善(按照某个期望的准则)系统自身的性质或性能的。一个最简单的自动机或自适应系统的例子是用在收音机或电视接收机中的自动增益控制(AGC)。这个电路的作用是按输入信号的平均强度反比例地调整接收机的灵敏度。因而这样的接收机能适应于宽范围的输入电平而得到一个窄范围的输出信号强度。

本书的目的是提出自适应的基本原理; 阐明基本形式的自适应系统的设计, 工作特性和应用; 描述物理实现的方法。讨论的系统类型主要包括那些用来作为自适应控制与自适应信号处理的系统。这样一些系统通常具有如下所有的或部分的特性:

1. 它们能够自动地适应(自最优)变化(非平稳)的环境与变化的系统要求。
2. 它们能够训练成去完成特定的滤波或判决任务。具有这些能力的系统综合是通过训练自动完成的。在某种意义上, 自适应系统可认为是通过学习过程编程了的系统。
3. 由上可知, 自适应系统不需要精确的综合方法, 而对非自适应系统则往往是必需的。自适应系统试图“自行设计”。
4. 它们经过有限的、通常是少量的训练信号或模式训练就能够外推至一个性能模型用以对付新的环境。
5. 在有限的范围内它们能够自我维修; 即是说, 它们能适应于一定类型的内部故障。
6. 它们通常被描述成是一种具有时变参量的非线性系统。

7. 与非自适应系统相比通常它们更复杂、更难于分析, 但是当输入信号特性是未知或时变的时候它们从本质上提供了改善系统性能的可能性。

1.2 应用领域

在今天, 微电子电路的飞速发展已经可以设计与制造出十分紧凑、经济、可靠的信号处理器。这种处理甚至可以在体积上与生物神经系统相匹配, 而在速度上则明显地占优势。于是包括自适应信号处理在内的各种类型的信号处理技术得到愈来愈广泛的应用。对于自适应系统最通常的应用领域是通讯、雷达, 声纳, 地震学, 机械设计, 导航系统与生物医学电子学。

本书的第四篇将讨论有关的应用, 前言部分将给出各种应用领域一个粗略的轮廓。第九章涉及到有关自适应系统模拟与辨识, 即用一个自适应系统去模拟一个未知的, 可以是随时间慢变的系统或被控系统(“plant”)。对于给定的输入信号自适应系统试图去“匹配”这个未知系统的输出。自适应模拟在机电系统的设计与试验方面有用。

第十章讨论逆模拟, 解卷积与均衡, 所有这些术语如同“逆滤波”一样是与消除器件或媒质对信号的影响过程有关。例如, 可以让声频系统对所有的语音频率有相同的增益, 或者消除传输线对雷达脉冲的影响。

第十一章是关于控制系统, 讨论的问题是: 假设控制系统的特性是随时间变化的, 如何让它适应于环境。一个典型的例子是飞机控制系统的传动比与响应时间是随着空气密度而变化的。在第十二章中讨论的自适应噪声对消器已在语音通讯, 心电图仪以及地震信号处理等领域得到了应用。由于真实的客观环境中噪声的特性常常不是平稳的, 因而自适应噪声对消器实际上在信号增强方面有广阔的应用前景。第十三、十四章描述一个新的应用的领域, 即自适应阵。在这个领域内自适应信号处理的概念特别有用。

1.3 一般性质

自适应系统最基本、最主要的性质是它的时变, 自调整性能。对具有这种性能的系统的需求容易看出。如果设计者采用固定参数的设计方法研制出一种他们认为是最佳的系统, 这就预示着设计者事先知道了一切可能的(至少在统计意义下)输入条件, 以及他们需要系统在这些条件下应该怎样动作。然后设计者选择了一个借以判断性能好坏的准则, 例如, 真实系统的输出与某些选定的或“理想”系统输出之间误差的大小。最后, 设计者按照性能准则选择了一个看来是最好的系统, 一般说来, 这个系统是从预先加以约束的一类系统(如线性系统)中选出来的。

然而, 在很多情况下, 输入条件的整个范围、那怕是在统计意义下也可能是不知道的, 或者它是随时间改变的。对于这样的环境, 采用一种有序的搜索过程, 在一类允许的可能范围内不断地寻找最佳值的自适应系统比之于固定设计的系统将给出更优越的性能。

就其本性而言, 自适应系统必须是时变、非线性系统。特别是它们的特性与其输入