

● [英] C. F. N. 科恩 主编
P. M. 格兰特

自适应滤波器



邵祥义 林溪波 朱海青 译
杨自诚 校

● 复旦大学出版社



内 容 提 要

本书全面系统地论述自适应滤波的基本理论、基本算法及各种实现方法,着重介绍自适应滤波器在电信及其他领域的广泛应用。全书共分九章,分别介绍自适应滤波器的种类、自适应滤波器的理论基础——最佳估计方法、FIR 滤波器的自适应算法、IIR 滤波器的自适应算法、递归最小平方估计以及格型滤波器、频域自适应滤波器、模拟和数字自适应滤波器的实现方法及其广泛应用。

本书可供邮电、电子工程、自动控制、军事科学、生物医学等专业的科技工作者参考,也可供高等院校有关专业的教师、研究生和高年级学生参考。

Adaptive Filters

Edited by C. F. N. Cowan and P. M. Grant

Prentice-Hall, Inc., 1985

自 适 应 滤 波 器

[英]C·F·N·科恩 P·M·格兰特 主编

邵祥义 林溪波 朱海青 译

杨自诚 校

复旦大学出版社出版

(上海国权路 579 号)

新华书店上海发行所发行 复旦大学印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 10.5 字数 300,000

1990 年 4 月第 1 版 1990 年 4 月第 1 次印刷

印数 1—4,000

ISBN 7-309-00349 7/O·60

定价: 2.50 元

译 者 的 话

自适应滤波器理论与技术是 50 年代末开始发展起来的,它是现代信号处理技术的重要组成部分,对复杂信号的处理具有独特的功能。C.F.N.科恩和 P.M.格兰特主编的《自适应滤波器》一书是对信号处理技术一个比较全面系统的总结。

近十年来,随着微电子技术、计算机技术的迅速发展,具备了实现自适应滤波器技术的条件,有关自适应滤波器的新算法、新理论和新的实施方法的不断涌现,各国学者对自适应滤波的稳定性、收敛速度和跟踪特性的研究不断深入,这一切使这门新兴技术越来越成熟,自适应滤波在信道均衡、回波抵消、谱线增强、噪声抑制、天线自适应旁瓣抑制、雷达杂波抵消、相参检测、谱估计、窄带干扰抑制、系统辨识、系统建模、语音信号处理、生物医学电子学等方面获得广泛的应用。

我们在从事自适应滤波方面的教学和科研工作中,深感目前国内这一领域资料缺乏,尚无一本有关自适应滤波方面的专门论著,因此我们翻译了这本专著。本书的七位作者,均是美国和英国的信号处理专家,他们在自适应信号处理领域中进行过深入的研究。该书内容新颖,论述全面,富有系统性。我们深信,本书的出版将会满足通信、自动控制、电路与系统、雷达和声纳等领域科技工作者的迫切需要,对于促进我国数字信号处理学科的发展将起良好的作用。

本书前言及第一~四、九章由邵祥义翻译,第五、六章由林溪波翻译,第七、八章由朱海青翻译。杨自诚校阅全稿。

由于译者水平所限,译文中错误、不当之处难免,敬请读者批评指正。

1987.8

前 言

从60年代开始,自适应处理器就成为人们研究的对象,以后主要被应用在自适应滤波器、自适应天线等许多实际系统中。本书主要介绍已获得广泛应用的自适应滤波器,例如在电信数传系统中用到的自适应均衡器。遗憾的是,与自适应处理器的各种设计有关的甚至是很基本的背景知识,只有从很分散的研究文献(例如信号处理、天线和控制理论等出版物)中才能找到。这样,对于初学者来说,要收集这一专题的资料并在此基础上制订设计方案是十分困难的。因此,本书的主要目的是对自适应滤波提供系统而又易于理解的基础知识,其内容包括基本理论、实际实现方法以及各种应用。

我们在编写本书时力求体现出这样一种特色,既照顾到内容的广泛性,又充分考虑到书中理论章节和实际应用章节之间的平衡。我们希望这样的编排能使从事研究生教学和科学研究的学术界对本书感兴趣,而且使需要尽快了解这些处理器实用可能性的实际工程技术人员也同样感兴趣。

本书在内容上,首先对自适应滤波器作一概述,然后以五章的篇幅深入地阐述几种可供替换的自适应算法的理论进展。其中,第二章介绍估计理论,它为后面几章奠定了理论基础。接下来的三章分别介绍自适应有限冲激响应、无限冲激响应以及格型等滤波器。此外,为了减少计算的复杂性,近几年来人们对采用频域处理技术实现自适应滤波器的方法愈来愈感兴趣,这促使我们撰写了第六章,其内容涉及自适应滤波的信号变换技术。我们相信,这种编排不仅保证本书在内容上能反映自适应滤波领域的最新研究成果,而且还为实现这些滤波器提供范围很广的各种技术手段。

和上述理论性较强的章节相对应的是,介绍自适应滤波器的一些可能应用领域的三个实用章节。其中,第七章深入地阐述了自适应滤

波器的实现方法，第八章介绍了它们在通信均衡和回波抵消中的重要应用。至于在其他方面的用途，例如高频（HF）快速跟踪滤波器、数字式微波接收机、线性预测编码以及最大熵和最大似然分析方法等内容也将在第九章作简单介绍。

为了编写好本书这些范围很广的专题，我们与熟悉这些领域的专家保持联系，并邀请他们以综述形式来撰写这些章节。这样可保证本书的材料，比直接引用单篇研究文献更为全面并且易于理解。本书的编写者力求统一地用可达到的性能和实现复杂性这两项指标来比较滤波器设计的各种方法。本书在卷首定义了统一的符号标记，我们希望通过这一编排使各章节之间能够相互参考，为理解不同滤波器实现方法的实际意义提供方便，而避免在混乱的术语符号上浪费精力。

本书的全部参考文献已列出一个清单附在卷末，以方便读者检索。

缩 写

ADO	Analog-to-digital converter	模数转换器
AGC	Automatic gain control	自动增益控制
ALCE	Adaptive lattice channel equalizer	自适应格型信道均衡器
ALE	Adaptive line enhancement	自适应谱线增强
AR	Autoregressive	自回归
ARC	Automatic reference control	自动基准控制
ARMA	Autoregressive moving average	自回归滑动平均
BBD	Bucket-brigade device	桶链器件
BIBO	Bounded-input bounded-output	有界输入有界输出
CAD	Computer-aided design	计算机辅助设计
CCD	Charge-coupled device	电荷耦合器件
CCITT	International Telegraph and Telephone Consultative Committee	国际电报电话咨询委员会
CMOS	Complementary metal-oxide silicon (transistor)	互补式金属氧化硅(晶体管)
CORDIC	Coordinate rotation digital computer	坐标旋转数字计算机
CSLC	Coherent sidelobe canceler	相干旁瓣抵消器
CW	Continuous wave(sinusoid)	连续波(正弦信号)
CZT	Chirp z-transform	调频 z 变换
DAO	Digital-to-analog converter	数模变换器
DC	Direct current(i. e., at zero frequency)	直流(即零频率)
DFB	Decision feedback	判决反馈

DFT	Discrete Fourier transform	离散傅里叶变换
DSBAM	Double-sideband amplitude modulation	双边带幅度调制
DSP	Digital signal processing	数字信号处理
EEG	Electroencephalograph	脑电图
FDM	Frequency-division multiplex	频分多路复用
FIR	Finite impulse response	有限冲激响应
FFT	Fast Fourier transform	快速傅里叶变换
FLMS	Fast least mean squares	快速最小均方
FT	Fractional tap	分数抽头
GaAs	Gallium arsenide	砷化镓
HARF	Hyperstable adaptive recursive filter	超稳定自适应递归滤波器
HF	High frequency	高频
IC	Integrated circuit	集成电路
IF	Intermediate frequency	中频
IIR	Infinite impulse response	无限冲激响应
ISI	Intersymbol interference	码间干扰
LO	Inductor capacitor	电感电容器
LMS	Least-mean-squares	最小均方
LOS	Line of sight	视线
LPC	Linear predictive coder	线性预测编码器
LSALE	Least-squares adaptive lattice equalizer	最小平方自适应格型均衡器
LSI	Large scale integration	大规模集成
LSL	Least squares lattice	最小平方格型
LST	Loud-speaking telephone	增音电话
MA	Moving average	滑动平均
MDAO	Multiplying digital-to-analog converter	乘法型数模转换器

MEM	Maximum-entropy method	最大熵方法
MLM	Maximum-likelihood method	最大似然方法
MMSE	Minimum mean-square error	最小均方误差
MR	Multiple response	多重响应
MSE	Mean-square error	均方误差
MSI	Medium-scale integration	中规模集成
MSTMP	Mean-square tap misadjustment power	均方抽头失调功率
NEC	Nippon Electric Company	日本电气公司
NMOS	Negative(doped) metal-oxide silicon(transistor)	负(掺杂)金属氧化硅(晶体管)
ODE	Ordinary differential equation	常微分方程
OEM	Own equipment manufacture	专用设备制造
PARCOR	Partial correlation	部分相关
PCM	Pulse-code modulation	脉冲编码调制
PN	Pseudonoise	伪噪声
PRBS	Pseudorandom bit sequence	伪随机位序列
PSK	Phase-shift keying	相移键控
PTF	Programmable transversal filter	可编程横向滤波器
QAM	Quadrature amplitude modulation	正交幅度调制
RAM	Random access memory	随机存取存储器
RF	Radio frequency	射频
RLS	Recursive least squares	递推最小平方
RNS	Residue number system	余数系统
ROM	Read-only memory	只读存储器
S	Radar frequency band	雷达频段
SAW	Surface acoustic wave	声表面波
SHARF	Simple hyperstable adaptive recursive filter	简单超稳定自适应递归滤波器
SNR	[Signal-to-noise ratio	信号噪声比

SOS	Silicon on sapphire 蓝宝石衬底硅片
SPR	Strictly positive real 严格正实
SQNLSL	Square-root normalized least-squares lattice 平方根归一化最小平方格型
TDL	Tapped delay line 抽头延迟线
TDM	Time-division multiplex 时分多路复用
TDOA	Time difference of arrival 到达时间差
TM	Transmultiplexer 多路复用转换器
TTL	Transistor-transistor logic 晶体管-晶体管逻辑
UFLMS	Unconstrained frequency-domain least mean square 无约束频域最小均方
UHF	Ultra high frequency 超高频
ULA	Uncommitted logic array 待连接逻辑阵列
VHF	Very high frequency 甚高频
VLSI	Very large scale integration 超大规模集成
VSBAM	Vestigial sideband amplitude modulated 残留边带幅度调制
WAL2	Walsh2-signal format for telecommunications transmission 电信传输用沃尔什2型信号格式
X	Radar frequency band 雷达频段 X

符 号 表

本书尽可能采用统一的符号。这里的符号表收集了本书许多章节中出现的数学符号和算符。

第六章描述频域自适应算法，它所使用的符号与本书其他章节所采用的有很大不同。因此，该章符号在其引言中单独加以说明。第五章的符号解释在其引言里说明，本书的其他章节省略掉时间符号 t 。

标量变量

a_i	IIR 滤波器的第 i 个前馈系数
b_i	IIR 滤波器的第 i 个反馈系数
$b_j(t)$	t 时刻第 j 级格型滤波器的反向信号
$d(n)$	自适应滤波器的期望输出
$e(n)$	自适应滤波器输出端的误差信号
$f_j(t)$	t 时刻第 j 级格型滤波器的前向信号
h_i	滤波器冲激响应的第 i 个值
J_H	参数矢量 \mathbf{H} 表示的代价函数
k_i	第 i 级格型反射系数 (PARCOR)
$K(n)$	卡尔曼增益
M	自适应过程的失调系数
$r(\tau)$	滞后 τ 时间的自相关值
$s(n), x(n)$	滤波器的输入信号
$y(n)$	自适应滤波器的期望输出
$\hat{y}(n)$	估计过程的输出
$\gamma_{i,T}$	格型滤波器的似然变量
$\eta(n), v(n)$	白色高斯噪声信号
λ	指数加权 RLS 算法的记忆因子

λ_i	自相关矩阵 \mathbf{R} 的特征值
μ, ρ	自适应算法的收敛系数
σ_v^2	信号 $v(n)$ 的均方值(功率)
τ_i	自适应模式第 i 个特征值收敛速率的时间常数

算 符

$E\{\cdot\}$	$\{\cdot\}$ 的统计期望
$\text{Im}[\cdot]$	$[\cdot]$ 的虚部
$\text{Re}[\cdot]$	$[\cdot]$ 的实部
$\text{sgn}[\cdot]$	$[\cdot]$ 的符号
$\text{tr}[\cdot]$	矩阵 $[\cdot]$ 的迹
\mathbf{z}	下移算符
\mathbf{z}^{-1}	单位取样延迟
$\nabla_{\mathbf{H}}$	参数矢量 \mathbf{H} 的梯度算符
Σ	求和算符
Π	求积算符

矩 阵

除非特别声明, 本书中所采用的矢量一律表示成列矢量。用上标 T 表示矩阵的转置运算, 即 $\mathbf{X}^T = [x_1 x_2 \cdots x_N]$ 。

$\mathbf{H}(n)$	FIR 滤波器的权系数矢量
\mathbf{H}_{opt}	最佳(维纳)估计滤波器权系数矢量
$\tilde{\mathbf{H}}(n)$	矢量 $\mathbf{H}(n)$ 与 \mathbf{H}_{opt} 的误差
$\mathbf{K}(n)$	卡尔曼增益矢量
\mathbf{P}	互相关矩阵
\mathbf{R}	自相关矩阵
$\mathbf{S}(n), \mathbf{X}(n)$	滤波器输入信号的 $N \times 1$ 矢量
$\theta(n)$	IIR 滤波器的权系数矢量
\mathbf{L}	特征值对角矩阵
ϕ	RLS 算法中观察参数的扩展矩阵

目 录

译者的话

前言	1
缩写	1
符号表	1
第一章 自适应滤波器导论	1
1.1 自适应处理	1
1.1.1 自适应滤波器	2
1.1.2 自适应滤波器的功能	3
1.2 可编程滤波器的设计	5
1.2.1 递归滤波器	5
1.2.2 非递归滤波器	7
1.2.3 变换型滤波器	9
1.3 最佳线性估计	10
1.4 自适应滤波器	11
1.4.1 自适应无限冲激响应滤波器	11
1.4.2 自适应有限冲激响应滤波器	11
1.4.3 变换型自适应滤波器	13
1.4.4 硬件设计	13
第二章 最佳估计方法	15
2.1 引言	15
2.2 最佳非递归(维纳)估计	16
2.2.1 维纳估计器实例	17
2.3 最佳递归(卡尔曼)估计	21
2.3.1 标量卡尔曼滤波器	21
2.3.2 卡尔曼增益的推导	24
2.4 矢量卡尔曼滤波器	25

2.4.1	作为信道均衡器的矢量卡尔曼滤波器	26
2.5	结论	28
第三章	有限冲激响应滤波器的自适应算法	30
3.1	引言	30
3.2	递归最小平方 (RLS) 算法	31
3.2.1	RLS 算法的推导	33
3.2.2	指数加权 RLS	34
3.2.3	计算复杂性	36
3.2.4	随机解释	37
3.2.5	最小平方估计的渐近精度	39
3.2.6	自适应滤波器的渐近特性	40
3.2.7	平方根实现	41
3.2.8	RLS 的滑动窗形式	42
3.3	最小均方自适应算法	44
3.3.1	最优系数矢量的迭代计算	44
3.3.2	LMS 算法	46
3.3.3	LMS 算法的收敛性	47
3.3.4	学习曲线	49
3.3.5	最新的收敛性分析结果	51
3.3.6	LMS 算法是随机逼近方法的特例	52
3.4	线性相位自适应有限冲激响应滤波器	58
3.4.1	随机情形	59
3.4.2	RLS 算法	61
3.4.3	LMS 算法	62
第四章	无限冲激响应滤波器的自适应算法	64
4.1	引言	64
4.1.1	概述	64
4.1.2	为何采用 IIR 自适应滤波器	64
4.1.3	问题的描述	66
4.1.4	反馈的含义	67
4.2	最小均方误差方法	67
4.2.1	求解的必要条件	67

4.2.2	求解方法	69
4.2.3	历史的回顾	71
4.3	非线性稳定性理论方法	72
4.3.1	问题的描述	72
4.3.2	超稳定自适应递归滤波器	73
4.3.3	超稳定性和自适应滤波	76
4.3.4	简单的超稳定递归滤波器	82
4.4	收敛特性分析	86
4.4.1	收敛特性分析的目的	86
4.4.2	分析的各种途径	87
4.4.3	一般结论	93
4.5	IIR 自适应滤波器应用的局限性	94
4.5.1	系数灵敏度	94
4.5.2	非最小相位滤波器的逆向建模	94
4.5.3	阶数匹配	95
4.5.4	逆向建模中用到的稳定性方法	95
4.6	结论	96
第五章	递归最小平方估计和格型滤波器	97
5.1	引言	97
5.2	广义格型数字滤波器结构	98
5.3	格型结构特性	105
5.3.1	正交特性	105
5.3.2	物理解释	108
5.4	反射系数的取样数据估计	112
5.4.1	反射系数的梯度估计	113
5.5	递归最小平方格型算法	115
5.5.1	递归估计公式	116
5.5.2	阶数修正方程	118
5.5.3	时间修正方程	120
5.5.4	精确的最小平方格型递归表达式	121
5.5.5	似然变量	123
5.6	联合过程格型滤波器	124

6.7	平方根归一化的最小平方格型结构	126
5.8	计算复杂性和 CORDIC 算法	131
5.8.1	CORDIC 算法	132
5.8.2	用旋转实现格型滤波	134
5.9	计算机模拟和应用	136
5.10	评述和结论	152
第六章	频域自适应滤波	154
6.1	引言	154
6.2	基于循环卷积的频域自适应滤波器	155
6.3	一般自适应滤波的算法	161
6.3.1	快速的 LMS 自适应滤波器	161
6.3.2	无约束频域 LMS 自适应滤波器	166
6.4	信道均衡	170
6.4.1	分离脉冲均衡	170
6.4.2	随机数据序列均衡	174
6.5	多路复用转换自适应滤波器	174
6.6	收敛速率改进	181
6.7	结论	185
6.8	附录	186
第七章	模拟与数字自适应滤波器实现综述	189
7.1	引言	189
7.2	数字实现	190
7.2.1	经典数字设计方法	190
7.2.2	采用简化算法的数字自适应滤波器	193
7.2.3	采用存贮器寻址技术的数字自适应滤波器	198
7.2.4	分布运算自适应滤波器	198
7.2.5	余数系统	203
7.3	模拟取样数据自适应滤波器	206
7.3.1	电荷耦合器件的实现方法	206
7.3.2	单片 CCD 自适应滤波器	213
7.4	采用声表面波器件的宽带自适应滤波器	216

7.5	VLSI 技术设计方法展望	220
第八章	自适应滤波器在通信中的应用	223
8.1	引言	223
8.2	数据传输	224
8.2.1	电话网络中的线性失真	224
8.2.2	话音频段均衡器	230
8.2.3	用于话音频段数据传输的回波抵消	239
8.3	局部网络数据传输	250
8.3.1	对 WAL 2 形式传输的回波抵消	251
8.3.2	基带传输	256
8.4	回波抵消在电话中的应用	259
8.4.1	网络回波抵消器	259
8.4.2	终端回波抵消器	262
8.5	与通信有关的其他应用	264
第九章	自适应滤波器的其他应用领域	265
9.1	引言	265
9.2	自适应估计	266
9.2.1	逆向系统建模	266
9.2.2	直接系统建模	272
9.3	谱估计	273
9.3.1	引言	273
9.3.2	谱线增强	276
9.3.3	语音处理	279
9.4	自适应阵列处理	283
9.4.1	方位估计	285
9.5	结论	288
参考文献		289

第一章 自适应滤波器导论

1.1 自适应处理

从输入信号提取信息的常规信号处理系统(例如匹配滤波器)都工作在开环状态。就是说,不管系统在前一段时间内的处理功能是否得到正确的结果,在当前这段时间内系统还是执行这个同样的处理功能。换句话说,常规的信号处理技术做了一个基本的假定,认为信号失真已是已知的、不随时间变化的量。

在另一方面,自适应处理器 [Widrow and Stearns 1984, Masentten] 则工作在闭环(反馈)状态。输入信号 $s(n)$ 通过可编程滤波器滤波或加权后产生一个输出 $\hat{y}(n)$, 然后它与期望的参考或训练信号 $y(n)$ 进行比较, 形成误差信号 $e(n)$ 。接着, 用这一误差信号来修正可编程滤波器的权系数(通常用迭代方法来实现), 最终使这一误差逐渐达到最小值(也就是使处理器的输出更逼近于训练信号)。这种自适应处理器可划分成自适应滤波器(图 1.1) 和自适应天线 [Monzingo and Miller, Hudson, Gabriel 1976(2), and Taylor] 两大类。

本书所讨论的自适应滤波器涉及到可编程滤波器的应用问题, 这种可编程滤波器的频率响应或传递函数是变化的或自适应的, 其作用是无失真地通过信号中所需要的分量, 衰减掉不需要的或干扰的分量, 或者减少输入信号中的畸变分量。自适应天线则完成天线阵列的空间处理, 使主瓣的最大值指向信号源方向, 而让波束方向图在干扰源的方向上形成一个等于零的最小值。因此, 自适应天线是利用空间处理技术来减少干扰。

在自适应系统中, 必须使所要求的有关输入信号的先验信息达到真正最小。自适应滤波器的动作原理是通过估计输入信号的统计特性并调整其本身的响应使某一代价函数达到最小值。代价函数可由许多