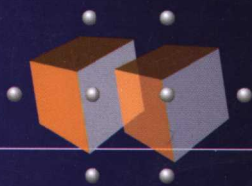


高等学校电子信息科学与工程专业教材



# 自适应滤波 (第二版)

## ——时域自适应滤波和智能天线

龚耀寰 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

高等学校电子信息科学与工程专业教材

# 自适应滤波(第二版)

——时域自适应滤波和智能天线

龚耀寰 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书系统讨论了自适应滤波——时域自适应滤波和空域自适应滤波(智能天线)的理论和应用。本书分为五部分,共十四章和两个附录。第一部分(第1和第2章)为绪论,介绍自适应滤波基本概念和最佳滤波。第二部分(第3至第8章)讨论时域自适应滤波,包括最小均方(LMS)算法、自适应格形滤波器、最小二乘和递推最小二乘(RLS)算法、卡尔曼滤波和平方根RLS自适应滤波器、最小二乘格形算法和快速横式滤波算法、频域自适应滤波器。第三部分(第9至第11章)讨论空域自适应滤波——智能天线,包括智能天线数字波束形成(DBF)、空域自适应滤波(智能天线)算法、智能天线系统的实现。第四部分(第12至第14章)讨论自适应滤波的应用,包括无线移动通信系统智能天线、自适应滤波技术在雷达中的应用、自适应均衡和自适应噪声对消。第五部分为附录。

本书着重基本概念、基本分析方法、主要算法和工程应用,讨论力求深入浅出和简明扼要,可作为信息与通信工程学科各有关专业的本科生和研究生教材,亦可供从事通信、雷达、导航、声呐、遥感、计算机的广大工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

自适应滤波(第二版)——时域自适应滤波和智能天线/龚耀寰编著. —北京:电子工业出版社,2003.7

电子信息科学与工程专业教材

ISBN 7-5053-8251-9

I. 自… II. 龚… III. 跟踪滤波器—高等学校—教材 IV. TN713

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第049848号

责任编辑:王 颖

印 刷:北京牛山世兴印刷厂

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

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:787×980 1/16 印张:29 字数:702千字

版 次:2003年7月第1版 2003年7月第1次印刷

印 数:5000册 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

# 前 言

本书讨论了电子信息科学的一个重要新技术——自适应滤波的理论和应用。自适应滤波包括时域自适应滤波和空域自适应滤波——智能天线。它和信息论、优化理论、检测与估计、计算机科学等紧密相关,是未来各种智能化系统的基础之一。自适应滤波在通信、雷达、导航、电子对抗、声呐、遥感、生物医学、地球物理、自动控制、经济学、社会学都有广泛的应用和应用前景。

本书力求具有较高的科学性,并反映自适应滤波技术的历史发展和最新进展。本书着重基本概念、基本分析方法、主要算法和工程应用,讨论力求深入浅出和简明扼要。

本书分为五部分,共十四章和两个附录。第一部分为绪论,包括第1~2章,介绍自适应滤波基本概念和最佳滤波。第五部分为两个附录,介绍了包括矩阵和矢量、线性组合器加权的表示法。

第二至第四部分为本书主体。第二部分讨论时域自适应滤波,包括第3~8章。分别介绍了最小均方(LMS)自适应算法、自适应格形滤波器、最小二乘(LS)和递推最小二乘(RLS)自适应滤波器、卡尔曼滤波和平方根RLS自适应滤波器、最小二乘格形(LSL)算法和快速横式滤波(FTF)算法、频域自适应滤波器。

第三部分讨论了空域自适应滤波——智能天线,包括第9~11章。空域自适应滤波有许多大体等价的名称,如智能天线、自适应天线、自适应阵列、数字波束形成(DBF)等。智能天线这一术语首先于1990年初出现在通信领域并迅速得到广泛应用。该词较为形象地表示了自适应空域滤波的作用——天线系统能根据环境情况自适应调整参数以实现最佳处理,即具有一定程度的智能化,从而与传统的参数固定的天线有本质的区别。因此本书副标题采用了该词。这部分分别介绍了智能天线数字波束形成(DBF)、空域自适应滤波(智能天线)算法、智能天线系统的实现。由于篇幅限制,略去了对信号到来角(DOA)估计的讨论。

第四部分讨论了自适应滤波的应用,包括第12~14章。分别介绍了无线移动通信系统智能天线、自适应滤波技术在雷达中的应用、自适应均衡和自适应噪声对消。这些内容也可在其他领域应用自适应滤波技术时参考。

本书第一版是在作者于1983年用英文编写的讲义 *Adaptive Signal Processing* 的基础上写成的。J.W.R.Griffiths 教授、保铮院士、顾德仁教授、马远良教授、梁甸农教授、原电子工业部无线电技术与信息系统教材编审委员会雷达编审小组成员和丁子明教授、黄辉宁教授、田立生教授以及许多其他专家审阅过该英文讲义和第一版书初稿。他们提出了许多宝贵意见。许多读者也对本书提出了意见和建议。张光义院士和其他专家、读者对第二版的编写多次鼓励。

几位学生参加了本书的文字录入和计算机仿真工作。作者在此表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限,书中难免存在缺点和错误,殷切希望读者指正。

龚耀寰  
2003年3月

# 目 录

第 1 章 自适应滤波基本概念	1
1.1 自适应滤波	1
1.2 自适应滤波器的组成	2
1.2.1 自适应滤波器的组成	2
1.2.2 可编程滤波器	2
1.3 空域滤波和时空对应	4
1.4 自适应滤波应用举例	7
1.4.1 雷达动目标显示	7
1.4.2 语音编码	8
1.4.3 自适应天线(智能天线)	10
1.4.4 军事扩频通信系统自适应抗干扰	12
1.4.5 自适应均衡	13
1.5 自适应滤波技术的发展简史	14
参考文献	19
第 2 章 最佳滤波	22
2.1 概述	22
2.1.1 自适应和最佳化	22
2.1.2 时域和空域滤波器的输入信号表示式	24
2.2 最小均方误差(MMSE)准则	26
2.3 最大信噪比(MaxSNR)准则	27
2.4 线性约束最小方差(LCMV)准则	29
2.5 最大似然(ML)准则	30
2.6 最小二乘(LS)准则	31
习题	33
第 3 章 最小均方(LMS)算法	36
3.1 最小均方误差滤波器	36
3.1.1 最小均方误差滤波器的推导	36
3.1.2 正规方程的解	39
3.1.3 正交原理	39
3.2 关于均方误差性能函数的进一步讨论	40

3.2.1	均方误差性能函数的各种表达式	40
3.2.2	几何意义	42
3.3	最陡下降法	43
3.3.1	最陡下降法的递推公式	43
3.3.2	最陡下降法的性能分析	44
3.4	最小均方(LMS)算法	47
3.4.1	最小均方(LMS)算法公式	48
3.4.2	LMS算法性能分析	50
3.5	修正的LMS算法	56
3.5.1	归一化LMS(NLMS)算法	56
3.5.2	简化的LMS算法	57
3.6	LMS算法的计算机仿真	58
3.6.1	自适应线性预测	58
3.6.2	模型识别	60
3.6.3	自适应均衡	62
	习题	66
	参考文献	68
<b>第4章</b>	<b>自适应格形滤波器</b>	<b>69</b>
4.1	线性预测滤波器	69
4.1.1	前向线性预测滤波器	69
4.1.2	后向线性预测滤波器	71
4.1.3	Levinson-Durbin 算法	73
4.2	格形滤波器	75
4.2.1	由预测滤波器推导格形滤波器	75
4.2.2	格形滤波器的特性	76
4.2.3	格形滤波器的各种形式	78
4.2.4	复信号的预测滤波器和格形滤波器	80
4.3	最小均方误差自适应格形滤波器	82
4.3.1	自适应格形滤波器的批处理算法	82
4.3.2	自适应格形滤波器的梯度算法	84
	习题	86
	参考文献	88
<b>第5章</b>	<b>最小二乘自适应滤波器</b>	<b>89</b>
5.1	时域最小二乘(LS)滤波器	89
5.1.1	时域最小二乘滤波方程	89
5.1.2	递推最小二乘(RLS)算法	92

5.2	RLS算法的收敛性	95
5.2.1	系统模型	95
5.2.2	LS估计的平均值	96
5.2.3	加权矢量误差的相关矩阵	96
5.2.4	学习曲线	98
5.3	对复信号的LS算法和RLS算法	99
5.4	RLS算法的计算机仿真	102
5.4.1	自适应线性预测	102
5.4.2	自适应模型识别	103
5.4.3	自适应均衡	105
5.4.4	RLS算法LMS算法的比较	106
	习题	108
<b>第6章</b>	<b>卡尔曼滤波器和平方根RLS自适应滤波器</b>	<b>110</b>
6.1	基本卡尔曼滤波算法	110
6.1.1	系统模型	110
6.1.2	预测	113
6.1.3	滤波	115
6.1.4	初始条件和卡尔曼预测算法流程	116
6.2	一种卡尔曼滤波自适应算法	117
6.2.1	算法	117
6.2.2	性能分析	120
6.3	卡尔曼滤波与RLS算法的对应	121
6.3.1	系统动态模型	121
6.3.2	方差卡尔曼滤波与RLS算法的对应	121
6.4	平方根卡尔曼滤波算法和平方根RLS算法	124
6.4.1	基于 $P^{1/2}(n)$ 递推的平方根卡尔曼滤波算法	124
6.4.2	基于 $R^{-1/2}(n)$ 的平方根RLS算法	127
6.4.3	基于 $P^{-1/2}(n)$ 递推的平方根卡尔曼算法及基于 $R^{1/2}(n)$ 递推的平方根RLS算法	128
6.5	平方根RLS算法的计算机仿真	130
	习题	133
	参考文献	136
<b>第7章</b>	<b>最小二乘格形(LSL)算法和快速横式滤波(FTF)算法</b>	<b>137</b>
7.1	矢量空间	137
7.1.1	希尔伯特空间	137
7.1.2	投影矩阵	140



7.1.3	单位现时矢量及角参量 .....	143
7.2	用矢量空间法研究最小二乘估计问题 .....	146
7.2.1	最小二乘估计归结于矢量空间问题 .....	146
7.2.2	前向线性预测滤波器 .....	148
7.2.3	后向线性预测滤波器 .....	150
7.2.4	线性预测误差剩余 .....	151
7.2.5	时间更新 .....	151
7.3	最小二乘格形(LSL)算法 .....	152
7.3.1	最小二乘格形滤波器 .....	152
7.3.2	反射系数的更新 .....	154
7.4	快速横式滤波(FTF)算法 .....	157
7.4.1	横式滤波算子和 FTF 算法的四个横式滤波器 .....	158
7.4.2	横式滤波算子的更新 .....	163
7.4.3	FIF 算法 .....	165
	习题 .....	172
	参考文献 .....	173
<b>第 8 章</b>	<b>频域自适应滤波器</b> .....	<b>174</b>
8.1	基于圆卷积的频域自适应滤波器 .....	174
8.2	批处理 LMS(BLMS)算法和快速 LMS(FLMS)算法 .....	177
8.2.1	批处理 LMS(BLMS)算法 .....	177
8.2.2	快速 LMS(FLMS)算法 .....	179
8.3	扩频信号窄带干扰抑制算法 .....	181
8.3.1	算法及框图 .....	181
8.3.2	性能分析 .....	182
	习题 .....	183
	参考文献 .....	184
<b>第 9 章</b>	<b>智能天线数字波束形成(DBF)</b> .....	<b>185</b>
9.1	数字波束形成(DBF)概述 .....	185
9.2	阵列天线输入矢量及相关矩阵 .....	186
9.2.1	阵列输入矢量 .....	186
9.2.2	输入矢量的相关矩阵 .....	189
9.3	普通波束形成和多波束形成 .....	192
9.3.1	线阵波束形成 .....	192
9.3.2	多波束 .....	196
9.3.3	赋形波束 .....	197
9.3.4	面阵波束形成 .....	198

9.3.5	发射波束形成	199
9.4	最佳波束形成器	200
9.4.1	最小均方误差(MMSE)波束形成器	201
9.4.2	最大信噪比(MaxSNR)波束形成器	201
9.4.3	线性约束最小方差(LCMV)波束形成器	202
9.5	旁瓣对消阵和部分自适应阵	205
9.5.1	自由度	205
9.5.2	全自适应阵和部分自适应阵	207
9.5.3	旁瓣对消阵	208
9.5.4	基于旁瓣对消器结构的部分自适应阵	210
	习题	213
	参考文献	215
<b>第 10 章</b>	<b>空域自适应滤波(智能天线)算法</b>	<b>217</b>
10.1	空域自适应滤波(智能天线)算法概述	217
10.2	QR 分解最小二乘(QRD-LS)算法	220
10.2.1	基本最小二乘算法	220
10.2.2	在数据域求最佳权	221
10.2.3	Givens 旋转	223
10.2.4	QRD-LS(QR 分解最小二乘)算法	223
10.2.5	直接提取剩余输出 QRD-LS 算法	226
10.2.6	QRD-LS 算法的计算机仿真 <sup>[8]</sup>	227
10.3	SMI(采样矩阵求逆)算法和 QRD-SMI(QR 分解 SMI)算法	230
10.3.1	SMI(采样矩阵求逆)算法	230
10.3.2	QR 分解 SMI 算法	231
10.3.3	对角加载原理及实现	234
10.3.4	QRD-SMI 算法的计算机仿真	236
10.4	QRD-LS 和 QRD-SMI 算法的 Systolic 实现	240
10.4.1	Systolic 和 Wavefront 处理结构	240
10.4.2	QRD-LS 算法的 Systolic 处理实现	243
10.4.3	QRD-SMI 算法的 Systolic 处理实现	247
10.5	基于 CORDIC 的自适应数字波束形成技术	251
10.5.1	CORDIC 实现坐标旋转的原理	251
10.5.2	基于 CORDIC 的无开方 Givens 处理	253
10.5.3	基于 CORDIC 的无开方无除法 Givens 处理	255
10.6	HA(Howells-Applebaum)算法	256
10.6.1	连续变量的 LMS 算法	256

10.6.2	HA 算法的公式和框图 .....	257
10.6.3	HA 算法性能分析 <sup>[23]</sup> .....	258
10.6.4	特征波束和自适应阵列波束 .....	261
10.7	稳健(Robust) 自适应算法 .....	264
10.7.1	导数约束法 <sup>[25]</sup> .....	264
10.7.2	特征空间法 <sup>[32]</sup> .....	267
10.7.3	半无穷维二次优化(SIQO)算法 <sup>[29]</sup> .....	270
10.8	唯相位(Phase-only) 波束形成算法 .....	274
10.8.1	概述 .....	274
10.8.2	权矢量幅度约束算法 <sup>[34][35]</sup> .....	274
10.8.3	期望方向增益最大约束算法 .....	276
10.8.4	小相位扰动约束算法 .....	279
10.8.5	单端口唯相位自适应阵列处理 .....	280
10.9	盲自适应算法 .....	282
10.9.1	恒模算法 .....	282
10.9.2	最小二乘恒模(LS-CMA)算法 <sup>[49][50]</sup> .....	283
10.9.3	最小二乘解扩重扩多目标阵列(LS-DRMTA)算法 .....	285
10.10	其他自适应算法 .....	288
10.10.1	正交投影算法 .....	288
10.10.2	具有严格约束的自适应算法 .....	290
10.10.3	功率倒置自适应算法 .....	295
10.10.4	微扰法 <sup>[59][11]</sup> .....	297
	习题 .....	301
	参考文献 .....	304
<b>第 11 章</b>	<b>自适应空域滤波(智能天线)的实现</b> .....	<b>308</b>
11.1	数字波束形成系统的组成 .....	309
11.2	窄带信号和宽带信号 .....	310
11.2.1	窄带信号 .....	310
11.2.2	空域滤波的窄带信号 .....	311
11.2.3	对窄带信号的处理 .....	313
11.2.4	宽带自适应阵 .....	314
11.3	通道失配校正及互耦校正 .....	314
11.3.1	通道失配的影响 .....	314
11.3.2	窄带通道失配的校正 .....	316
11.3.3	宽带通道失配的校正 .....	317
11.3.4	互耦校正 .....	319

11.4	动态范围、非线性失真和数字下变频 .....	319
11.4.1	动态范围 .....	319
11.4.2	非线性失真的影响 .....	320
11.4.3	正交混频器的失配和非线性 .....	320
11.4.4	中频采样 ADC 和基带采样 ADC .....	323
11.5	相关信号源及非零带宽信号 .....	323
11.5.1	相关信号源 .....	323
11.5.2	非零带宽信号 .....	324
11.6	量化误差及有限字长的影响 .....	325
11.6.1	有限字长引起的副瓣电平限制 .....	325
11.6.2	有限字长引起的干扰抑制性能下降 .....	326
11.7	权误差、信号方向误差的影响 .....	327
11.7.1	自适应权误差 .....	327
11.7.2	信号方向误差 .....	328
11.8	影响雷达旁瓣对消阵性能的其他因素 .....	329
11.8.1	杂波 .....	329
11.8.2	目标信号、干扰环境及极化 .....	329
11.8.3	路径失配 <sup>[3]</sup> .....	330
11.9	对处理机速度要求的估计 .....	330
	参考文献 .....	332
<b>第 12 章</b>	<b>无线移动通信系统智能天线 .....</b>	<b>334</b>
12.1	无线移动通信系统采用智能天线的必要性和性能改善 .....	334
12.1.1	概述 .....	334
12.1.2	采用智能天线后无线通信系统的性能改善 .....	334
12.2	智能天线对系统性能改善的估计 .....	337
12.2.1	单用户和白噪声情况 .....	337
12.2.2	对上行链路容量改善的估计 .....	338
12.2.3	对下行链路容量改善的估计 .....	342
12.3	工作方式和波束形成算法 .....	344
12.3.1	智能天线的工作方式 .....	344
12.3.2	智能天线波束形成算法分类 .....	345
12.3.3	智能天线各种方式的应用 .....	347
12.4	移动通信系统智能天线实验研究 .....	348
12.4.1	欧洲 TSUNAMI 智能天线项目 .....	348
12.4.2	日本移动通信 DBF 实验系统 <sup>[29]</sup> .....	349
12.4.3	其他实验系统 .....	350

12.5	空时联合处理方法	352
12.5.1	空时 RAKE(2D-RAKE)接收机	352
12.5.2	对 TDMA 体制的空时处理方法简述	355
12.6	多人多出(MIMO)智能天线技术	356
12.6.1	MIMO 概念	356
12.6.2	空时网格码	359
12.6.3	空时分组码	360
12.6.4	V-BLAST MIMO 算法	364
12.6.5	MIMO 研究近况	366
	参考文献	368
<b>第 13 章</b>	<b>自适应滤波技术在雷达中的应用</b>	<b>372</b>
13.1	雷达信号最佳滤波	372
13.2	雷达自适应动目标显示(MTI)滤波器	374
13.2.1	引言	374
13.2.2	调整相干振荡器频率的自适应 MTI 系统	374
13.2.3	普通 DMTI	376
13.2.4	开环自适应 MTI 滤波器	377
13.2.5	闭环自适应 MTI 滤波器	381
13.2.6	线性预测和自适应杂波对消	382
13.3	动目标检测(MTD)	384
13.4	超低副瓣及多波束	386
13.4.1	超低副瓣	386
13.4.2	多波束形成	387
13.5	旁瓣匿影(SLB)	387
13.6	自适应旁瓣对消(SLC)	388
13.7	机载雷达杂波抑制和 DPCA	390
13.7.1	用于单脉冲雷达的地杂波抑制电路	390
13.7.2	自适应技术和 DPCA 技术	392
13.8	时空联合处理	393
13.9	雷达自适应天线系统	397
13.9.1	开环旁瓣对消系统	397
13.9.2	X 波段雷达自适应干扰置零系统 <sup>[37]</sup>	399
13.9.3	林肯实验室 RST 雷达自适应 DBF 系统 <sup>[28]</sup>	401
13.9.4	美国海军数字阵列雷达(DAR)项目 <sup>[34][35]</sup>	404
	参考文献	405
<b>第 14 章</b>	<b>自适应均衡和自适应噪声对消</b>	<b>407</b>

14.1	自适应均衡	407
14.1.1	均衡器	407
14.1.2	自适应迫零均衡器	408
14.1.3	判决引导自适应均衡器	410
14.1.4	自适应分数间隔均衡器	411
14.1.5	自适应判决反馈均衡器	412
14.1.6	盲自适应均衡器	413
14.1.7	调制解调器和自适应均衡器的连接	414
14.2	自适应噪声对消	416
14.2.1	自适应噪声对消器的组成	416
14.2.2	自适应滤波在医学中的应用	418
14.2.3	消除声音信号的干扰	420
14.2.4	分离周期信号和宽带信号	421
14.2.5	利用噪声对消技术抑制扩频系统窄带干扰	421
	参考文献	424
<b>附录 A</b>	<b>矩阵和矢量</b>	<b>425</b>
A.1	矩阵	425
A.1.1	基本定义和基本运算	425
A.1.2	某些特殊矩阵	426
A.1.3	关于迹和行列式的关系式	429
A.1.4	矩阵求逆引理	430
A.2	矢量	431
A.2.1	在实数域上的矢量	431
A.2.2	在复数域上的矢量	433
A.2.3	矢量外积	434
A.3	二次型和埃尔米特型	435
A.3.1	二次型	435
A.3.2	埃尔米特型	435
A.4	特征值和特征矢量	436
A.4.1	基本概念	436
A.4.2	相似和矩阵的对角线化	437
A.5	实对称矩阵和埃尔米特矩阵	437
A.5.1	实对称矩阵	437
A.5.2	埃尔米特矩阵	438
A.6	梯度	440
A.6.1	定义	440

A.6.2	对实矢量的函数的梯度公式 .....	441
A.6.3	对复矢量的函数的梯度公式 .....	442
A.7	复变量函数的导数 .....	444
A.7.1	解析函数 .....	444
A.7.2	复矢量的复函数的导数 .....	445
附录 B	线性组合器加权及相关运算取共轭的位置 .....	448

# 第 1 章 自适应滤波基本概念

## 1.1 自适应滤波

从连续的(或离散的)输入数据中滤除噪声和干扰以提取有用信息的过程称为滤波。相应的装置称为滤波器。当滤波器的输出为输入的线性函数时,该滤波器称为线性滤波器,否则就称为非线性滤波器。根据滤波器的参数是否随时间变化,又可将滤波器分为时变和非时变滤波器两种。

滤波器是电子设备的最基本的部件,人们对其已进行了广泛的研究。滤波器研究的一个基本课题就是:如何设计和制造最佳的或最优的滤波器。所谓最佳滤波器是指能够根据某一最佳准则进行滤波的滤波器。20 世纪 40 年代,维纳<sup>[1~3]</sup>奠定了关于最佳滤波器研究的基础。假定线性滤波器的输入为有用信号和噪声之和,两者均为广义平稳过程且已知它们的二阶统计特性,维纳根据最小均方误差准则(滤波器的输出信号与需要信号之差的均方值最小),求得了最佳线性滤波器的参数。这种滤波器被称为维纳滤波器。它获得了极其广泛的应用。在维纳研究的基础上,人们还研究了根据最大输出信噪比准则、统计检测准则以及其他最佳准则求得的最佳线性滤波器。已经发现,在一定条件下,这些最佳滤波器与维纳滤波器是等价的。因而,讨论线性滤波器时,一般均以维纳滤波器作为参考。

要实现维纳滤波,就要求:①输入过程是广义平稳的;②输入过程的统计特性是已知的。根据其他最佳准则的滤波亦有同样要求。然而,由于输入过程取决于外界的信号、干扰环境,这种环境的统计特性常常是未知的、变化的,因而不能满足上述两个要求。这就促使人们研究自适应滤波器。

自适应滤波器是这样的处理器,它在输入过程的统计特性未知时,或是输入过程的统计特性变化时,能够调整自己的参数,以满足某种最佳准则的要求。当输入过程的统计特征未知时,自适应滤波器调整自己参数的过程称为“学习过程”。而当输入过程的统计特征变化时,自适应滤波器调整自己参数的过程称为“跟踪过程”。

自适应滤波器包括自适应时域滤波和自适应空域滤波(又称智能天线、自适应天线、自适应阵列、自适应波束形成等)。它和信息论、优化理论、检测与估计理论等密切相关,是近二十多年来发展起来的信息科学的一个重要分支,并在通信、雷达以及许许多多领域获得了广泛应用。



## 1.2 自适应滤波器的组成

### 1.2.1 自适应滤波器的组成

自适应滤波器的组成如图 1.1 所示。它可分为可编程滤波器(滤波部分)及自适应算法(控制部分)两部分。可编程滤波器即参数可变的滤波器,自适应算法对其参数进行控制以实现最佳工作。

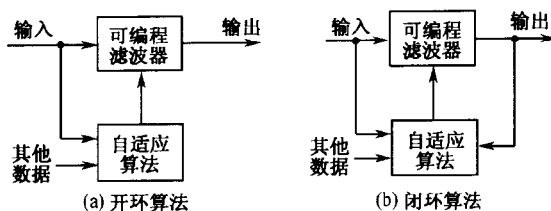


图 1.1 自适应滤波器的组成

自适应算法主要根据滤波器输入的统计特性进行处理。它可能还与滤波器输出和其他数据有关。根据自适应算法是否与滤波器输出有关,可以将其分成开环算法和闭环算法两类。开环算法的控制输出仅取决于滤波器的输入和某些其他数据,但不取决于滤波器的输出,如图 1.1(a)所示。闭环算法的控制输出则是滤波器输入、滤波器输出以及某些其他输入的函数,如图 1.1(b)所示。

闭环算法利用了输出反馈,它不但能在滤波器输入变化时保持最佳的输出,而且还能在某种程度上补偿滤波器元件参数的变化和误差以及运算误差。它的缺点是存在稳定性问题以及收敛速度不高。开环算法的优点是调整速度快,一般不存在稳定性问题。但通常它要求的计算量大且不能补偿元件参数误差及运算误差。因此,多数采用闭环算法。然而,在一些要求高速调整的系统中,如雷达系统,开环算法亦很受重视。

### 1.2.2 可编程滤波器

自适应滤波器的参数将随着输入信号的变化而变化,因而是非线性的和时变的。组成自适应滤波器的可编程滤波器,当其参数固定时,可能是线性的或非线性的。本书主要讨论线性可编程滤波器。时域线性可编程滤波器有 FIR(有限脉冲响应)横式滤波器、IIR(无限脉冲响应)横式滤波器以及格形滤波器等。

时域 FIR 横式滤波器的框图如图 1.2 所示。其输出  $y(n)$  为输入  $x(n) = x_1(n)$  及其延时值(或过去值)  $x(n-1) = x_2(n), \dots, x(n-M+1) = x_M(n)$  的线性组合

$$y(n) = \sum_{i=1}^M w_i^* x_i(n) = \sum_{i=1}^M w_i^* x(n-i+1) \quad (1.2.1)$$