

高等学校教材

# 自适应滤波

龚耀寰 编

电子工业出版社

## 内 容 简 介

本书系统讨论了自适应滤波的理论和应用。全书共六章。第一章叙述了自适应滤波的基本概念和发展简史。第二章到第五章详细讨论了各种主要的自适应滤波算法,其中包括最小均方(LMS)算法、卡尔曼滤波算法、线性预测和格形梯度算法、最小二乘格形(LSL)算法和快速横式滤波(FTF)算法、微扰法和各种约束算法。第六章介绍了自适应滤波在噪音对消、天线旁瓣对消、电话线路回声对消、通道均衡、语音处理、雷达动目标显示等各个领域的应用例子。书末附录还介绍了关于矩阵方面的知识。

本书注重物理概念、基本分析方法和实际应用,可作为通信与电子系统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、声纳、遥感、计算机的广大工程技术人员参考。

## 自 适 应 滤 波

龚耀寰 编

责任编辑:王玉国

\*

电子工业出版社出版 (北京市万寿路)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国科学院印刷厂印刷

\*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 11.25 字数: 301.7千字

1989年4月第一版 1989年4月第一次印刷

印数: 1-1600册 定价: 2.25元

ISBN 7-5053-0458-5/TN·161

## 出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定,我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978年至1985年,已编审、出版了两轮教材,正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻“努力提高教材质量,逐步实现教材多样化,增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神,我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会,在总结前两轮教材工作的基础上,结合教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1986~1990年的“七五”(第三轮)教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿,是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处,希望使用教材的单位,广大教师和同学积极提出批评建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

## 前 言

本教材系按电子工业部的工科电子类专业教材 1986~1990 年编审出版规划,由无线电技术与信息系统教材编审委员会雷达编审小组征稿,推荐出版,责任编委丁子明教授。

本教材由电子科技大学龚耀寰教授编写,北京理工大学黄辉宁副教授和清华大学田立生副教授担任主审。

本课程的参考教学时数为 40 学时,其主要内容为自适应滤波的理论和应用。自适应滤波技术包括自适应时域滤波和自适应空域滤波,并与自适应控制等技术密切相关。它是近二十多年来发展起来的信息科学的一个重要分枝,在通信、雷达、电子对抗、导航、声纳、遥感以及许多其它领域都有广泛的应用。本教材首先叙述了自适应滤波的基本概念和发展简史,然后详细讨论了各种主要的自适应滤波算法,其中包括最小均方(LMS)算法、卡尔曼滤波算法、线性预测和格形梯度算法、最小二乘格形(LSL)算法和快速横式滤波(FTF)算法等,最后介绍了自适应滤波在噪音对消、天线旁瓣对消、电话线路回声对消、通道均衡、语音处理、雷达动目标显示等各个领域的应用例子。本教材着重阐明自适应滤波技术的物理概念、基本分析方法和实际应用,尽可能反映这一领域研究工作的最新成就。

本教材是作者于 1983 年用英文编写的讲义“Adaptive Signal Processing”的基础上经多次修改补充而写成的。英国拉夫布若技术大学格里芬斯(J. W. R. Griffiths)教授、西安电子科技大学保铮教授、西北工业大学马远良教授、国防科技大学梁甸农副教授曾审阅过该讲义。参加本教材审阅工作的还有雷达编审组的诸位委员,他们都为本书提出了许多宝贵的意见。这里表示诚挚的谢意。由于编者水平有限,书中难免还存在不少缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

1988.10.12

# 目 录

<b>第一章 导论</b> .....	1
§ 1.1 自适应滤波.....	1
§ 1.2 自适应滤波器的组成.....	6
1.2.1 自适应滤波器的组成.....	6
1.2.2 可编程滤波器.....	7
1.2.3 自适应滤波的类型.....	8
§ 1.3 自适应滤波技术的发展简史.....	8
练习一.....	10
<b>第二章 自适应横式滤波器</b> .....	12
§ 2.1 最小均方误差滤波器.....	12
2.1.1 自适应和最佳化.....	12
2.1.2 最小均方误差滤波器.....	13
2.1.3 正规方程的解.....	15
2.1.4 正交原理.....	15
§ 2.2 关于均方误差性能函数的进一步讨论.....	16
2.2.1 均方误差性能函数的各种表达式.....	16
2.2.2 几何意义.....	17
§ 2.3 最陡下降法.....	18
2.3.1 最陡下降法的递推公式.....	18
2.3.2 最陡下降法的性能分析.....	19
§ 2.4 最小均方 (LMS) 算法.....	21
2.4.1 最小均方 (LMS) 算法.....	22
2.4.2 LMS 算法性能分析.....	23
§ 2.5 基于卡尔曼滤波的自适应算法.....	28
2.5.1 卡尔曼滤波方程.....	28
2.5.2 卡尔曼滤波自适应算法.....	30
2.5.3 卡尔曼滤波自适应算法的收敛速度.....	32
练习二.....	33
<b>第三章 自适应格形滤波器</b> .....	36
§ 3.1 线性预测滤波器.....	36
3.1.1 前向线性预测滤波器.....	36
3.1.2 后向线性预测滤波器.....	38
3.1.3 Levinson-Durbin 算法.....	39
§ 3.2 格形滤波器.....	41
3.2.1 由预测滤波器推导格形滤波器.....	41

3.2.2	格形滤波器的特性 .....	42
3.2.3	格形滤波器的各种形式 .....	43
3.2.4	对复信号的预测滤波器和格形滤波器 .....	44
§ 3.3	最小均方误差自适应格形滤波器 .....	47
3.3.1	自适应格形滤波器的批处理算法 .....	47
3.3.2	自适应格形滤波器的梯度算法 .....	48
练习三	.....	50
<b>第四章</b>	<b>最小二乘自适应滤波器</b> .....	<b>52</b>
§ 4.1	最小二乘滤波器 .....	52
4.1.1	最小二乘滤波方程 .....	52
4.1.2	递推最小二乘 (RLS) 算法 .....	54
§ 4.2	矢量空间 .....	56
4.2.1	希尔伯特空间 .....	56
4.2.2	投影矩阵 .....	58
4.2.3	单位现时矢量及角参量 .....	60
§ 4.3	用矢量空间法研究最小二乘估计问题 .....	62
4.3.1	最小二乘估计归结于矢量空间问题 .....	62
4.3.2	前向线性预测滤波器 .....	64
4.3.3	后向线性预测滤波器 .....	65
4.3.4	线性预测误差剩余 .....	66
4.3.5	时间更新 .....	66
§ 4.4	最小二乘格形 (LSL) 算法 .....	66
4.4.1	最小二乘格形滤波器 .....	66
4.4.2	反射系数的更新 .....	68
§ 4.5	快速横式滤波 (FTF) 算法 .....	70
4.5.1	横式滤波算子和 FTF 算法的四个横式滤波器 .....	70
4.5.2	横式滤波算子的更新 .....	74
4.5.3	FTF 算法 .....	76
练习四	.....	81
<b>第五章</b>	<b>自适应空域滤波——自适应阵列</b> .....	<b>83</b>
§ 5.1	导论 .....	83
5.1.1	维纳滤波器的频率响应 .....	83
5.1.2	空间频率及时空对应 .....	86
5.1.3	窄带信号 .....	88
5.1.4	对窄带信号的处理 .....	90
5.1.5	宽带自适应阵 .....	91
5.1.6	采用线性组合器进行空域滤波 .....	91
§ 5.2	关于 LMS 算法的进一步讨论 .....	92
5.2.1	用于空域处理的实信号 LMS 算法 .....	91
5.2.2	对复信号的最小均方误差处理器 .....	92
5.2.3	对复信号的 LMS 算法 .....	93

§ 5.3 HA (Howells-Applebaum) 算法 .....	94
5.3.1 HA 算法的公式和框图 .....	94
5.3.2 HA 算法性能分析 .....	95
§ 5.4 具有严格约束的自适应算法 .....	101
5.4.1 算法公式 .....	101
5.4.2 加权矢量的特征矢量展开式 .....	103
§ 5.5 功率倒置自适应算法 .....	104
§ 5.6 微扰法 .....	107
练习五 .....	110
<b>第六章 自适应滤波的应用</b> .....	<b>113</b>
§ 6.1 自适应噪音对消 .....	113
6.1.1 自适应噪音对消器的组成 .....	113
6.1.2 自适应滤波在医学中的应用 .....	115
6.1.3 消除声音信号的干扰 .....	118
6.1.4 分离周期信号和宽带信号 .....	118
§ 6.2 自适应旁瓣对消 .....	119
6.2.1 自适应旁瓣对消系统的组成 .....	120
6.2.2 自适应旁瓣对消系统的设计 .....	121
6.2.3 实际自适应阵列系统举例 .....	122
§ 6.3 自适应均衡器 .....	127
6.3.1 数据通信系统 .....	127
6.3.2 数字长途电话的自适应通道均衡器 .....	127
6.3.3 用于高频 (HF) 无线线路的自适应均衡器 .....	131
§ 6.4 自适应回声对消 .....	134
§ 6.5 语音处理 .....	136
6.5.1 自适应差分脉码调制 (ADPCM) 波形编码 .....	136
6.5.2 自适应量化 .....	137
6.5.3 声码器 .....	139
§ 6.6 雷达自适应动显 (MTI) 滤波器 .....	140
6.6.1 调整相干振荡器频率的自适应 MTI 系统 .....	140
6.6.2 开环自适应 MTI 滤波器 .....	141
6.6.3 闭环自适应 MTI 滤波器 .....	145
6.6.4 线性预测和自适应杂波对消 .....	147
§ 6.7 机载雷达杂波抑制 .....	149
6.7.1 用于单脉冲雷达的地杂波抑制电路 .....	149
6.7.2 自适应技术和 DPCA 技术 .....	150
6.7.3 时空联合处理实现自适应杂波抑制 .....	151
练习六 .....	152
<b>附录 矩阵和矢量</b> .....	<b>156</b>
§ A.1 矩阵 .....	156
A.1.1 基本定义和基本运算 .....	156

A.1.2 某些特殊矩阵.....	157
A.1.3 矩阵求逆引理.....	159
§ A.2 向量 .....	160
A.2.1 在实数域上的向量.....	160
A.2.2 在复数域上的向量.....	162
§ A.3 二次型和埃尔米特型 .....	162
A.3.1 二次型.....	162
A.3.2 埃尔米特型.....	163
§ A.4 特征值和特征向量 .....	163
A.4.1 基本概念的回顾.....	163
A.4.2 相似和矩阵的对角线化.....	164
§ A.5 实对称矩阵和埃尔米特矩阵 .....	164
A.5.1 实对称矩阵.....	165
A.5.2 埃尔米特矩阵.....	165
§ A.6 梯度 .....	167
A.6.1 定义.....	167
A.6.2 对实矢量的函数的梯度公式.....	168
A.6.3 对复矢量的函数的梯度公式.....	169
<b>参考文献</b> .....	<b>171</b>



# 第一章 导 论

## § 1.1 自适应滤波

从连续的(或离散的)输入数据中滤除噪音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的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。本世纪四十年代,维纳<sup>[1]</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音之和,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它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。根据其它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性未知时,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性变化时,自适应滤波器调整自己参数的过程称为“跟踪过程”。

自适应滤波包括自适应时域滤波、自适应空域滤波(即自适应阵列)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枝,并在通信、雷达以及许许多多领域获得了广泛的应用。

为了帮助读者理解自适应滤波的概念,现举几个例子。(更详细的实例将在第六章讨论。)

### 一、雷达动目标显示

众所周知,当目标相对于雷达有径向运动时,多普勒效应将使回波频率不同于发射频率。回波频率与发射频率之差为多普勒频率 $f_d$ 。 $f_d$ 可表成

$$f_d = \frac{2v_r}{c} f_0 \quad (1.1.1)$$

式中,  $c$  为光速,  $f_0$  为发射频率,  $v_r$  为目标径向速度。运动目标——飞机、坦克等是雷达感兴趣的目標。由于这些目标在运动, 它们的多普勒频率不为零。雷达在对飞机、坦克等目标进行观察时, 常常受到地面、建筑物、山脉等地物目标反射的回波和敌方施放的反射物(如锡箔片等)反射的回波的干扰。这些干扰回波统称为杂波。云雨、空中飞行的鸟群也要对雷达产生杂波干扰。通常, 产生杂波干扰的目标是不动的或是动得较慢, 其多普勒频率为零或接近零, 因而其回波频谱与感兴趣目标(活动目标)的回波频谱不同。这样, 利用一个高通滤波器即可将杂波滤除, 从而更好地发现感兴趣的目標。这就是雷达动目标显示的基本原理。其抑制杂波, 保持动目标回波的滤波器称为动目标显示滤波器或 MTI 滤波器。最早使用的是用水银线作的 MTI 滤波器, 后来改为熔石英延时线滤波器。现在, 广泛采用数字式 MTI 滤波器。

图 1.1 示出了一种广泛采用的具有固定高通特性的 MTI 滤波器——三脉冲对消器。其中的  $z^{-1}$  表示延时线, 其延时等于雷达脉冲重复周期。根据其输出

$$y(n) = x(n) - 2x(n-1) + x(n-2) \quad (1.1.2)$$

不难得到其传输函数为

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = 1 - 2z^{-1} + z^{-2} \quad (1.1.3)$$

相应的频率特性为

$$|H(f)| = 4\sin^2(\pi f/f_r) \quad (1.1.4)$$

式中  $f_r$  为雷达脉冲重复频率。这种 MTI 滤波器在零频具有一个零点, 如图 1.2 中的曲线 a 所示。通常的地物杂波频谱的中心在零频, 它将被这种滤波器大大地滤除, 从而使得对活动目标的探测更容易。

从一开始, 人们就发现采用这种滤波器的缺点。因为, 在有风情况下, 地物杂波也有变化, 从而使杂波频谱展宽, 有时甚至使地物杂波频谱中心偏离零频。对于云雨、鸟群、敌方施放的金属箔条等反射的杂波来说, 其频谱中心通常是偏离零频的, 而且其中心频率和频谱宽在不断地变化。在这种情况下, 固定滤波器的性能明显变坏, 而采用中心频率及抑制带宽跟随杂波频谱变化的自适应滤波器将获得很大的好处。一种自适应滤波器的方案

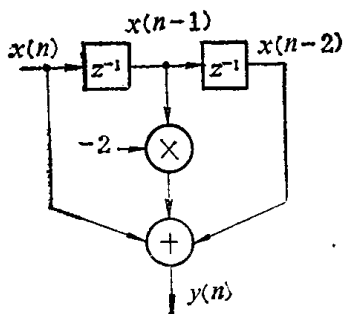


图 1.1 三脉冲对消器

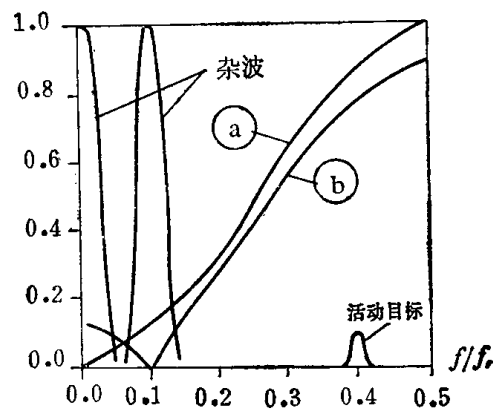


图 1.2 杂波频谱及 MTI 滤波器响应

示于图 1.3。与图 1.1 不同之处在于，它利用了一个可变加权系数  $-2\omega$ 。这时，输出  $y(n)$  与输入  $x(n)$  的关系为

$$y(n) = x(n) - 2\omega x(n-1) + x(n-2) \quad (1.1.5)$$

其频率特性为

$$|H(f)| = 2[\cos(2\pi f/f_r) - \omega] \quad (1.1.6)$$

显然，改变  $\omega$  就可改变频率特性的零点。在图 1.2 中的曲线⑤就是一条零点在  $f/f_r = 0.1$  的频率特性。若当杂波频谱的中心频率变化时， $\omega$  随着变化，始终保持自适应滤波器的零点对着杂波频谱的中心，就能大为改善 MTI 的性能。自适应滤波技术就是要研究如何利用输入信号的统计特性来建立滤波器参量（在现在情况就是  $\omega$ ）的调整算法。

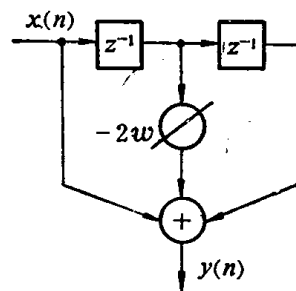
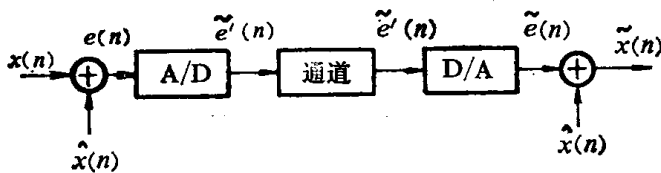


图 1.3 具有可调零点的三脉冲对消器

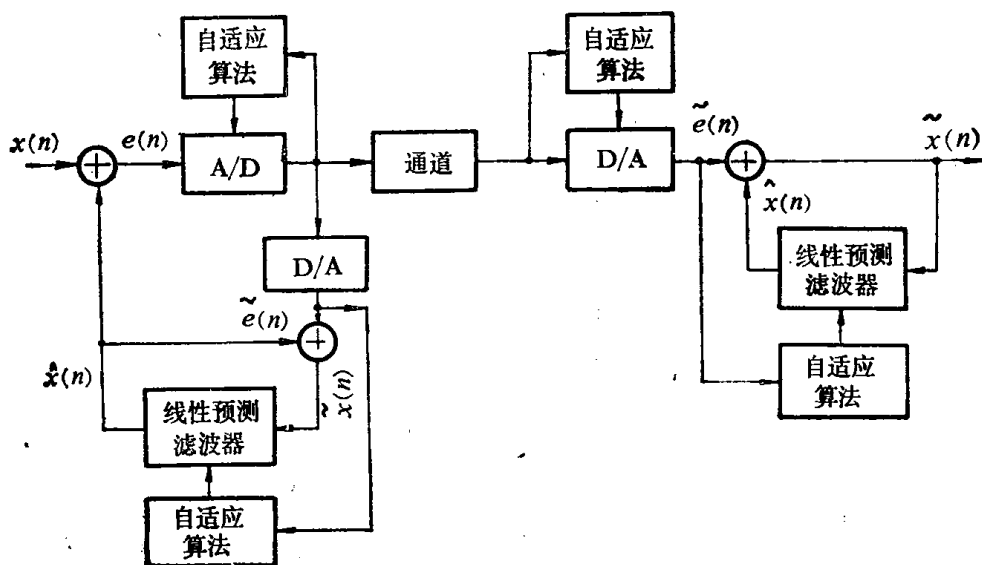
## 二、语音编码

用数字方法对语音进行编码，再通过通信线路传输的语音数字通信技术，具有可靠性高、灵活，易于实现人-计算机对话和复杂的处理，易于与其它信息（计算机数据、电视及传真）统一进行传输和用 VLSI 电路实现等一系列重要优点，因而被获得极大重视。

语音编码器可分为两类——声码器和波形编码器。声码器基于一个人类语音产生系统的模型。在发送端，声码器根据实际的语音信号确定模型参数，将这些参数数字化再传输。在接收端，声码器根据收到的数字化模型参数，用同样的模型恢复所传送的语音。



(a)原理



(b)完整的系统

图 1.4 DPCM 和 ADPCM

波形编码器基于保持语音波形。在发送端,波形编码器首先对语音信号进行采样、量化,然后以数字方式传输。在接收端,相应的解码器将收到的编码信号解码,以恢复所传送的语音。

声码器能够实现很低的传输率(可以低到 4.8KB/s 以下),但语音保真度较差。波形编码能够实现高的语音通信质量,但要求的传输率较高(一般在 16KB/s 以上)。两种编码方式均获广泛应用。这里,我们仅通过波形编码来讨论自适应滤波的应用。关于语音编码的更详细的讨论将在第六章进行。

语音波形编码可采用 PCM (脉码调制)、DPCM (差分脉码调制)、ADPCM (自适应差分脉码调制)、DM ( $\delta$  调制),ADM (自适应  $\delta$  调制)等多种方式。

PCM 在于对语音信号进行采样、量化后,再通过编码变成数字信号传输。PCM 简单可靠,是目前应用最广泛的语音编码方式。但它要求的传输率高。DPCM 利用语音信号的相关性以降低要求的传输率。为理解 DPCM,我们来看图 1.4(a) 的框图。在发送端,输入语音信号  $x(n)$  先减去其预测值  $\hat{x}(n)$ ,然后将预测误差

$$e(n) = x(n) - \hat{x}(n) \quad (1.1.7)$$

进行 A/D 变换,得到量化预测误差  $\tilde{e}'(n)$ ,并以串行码形式传送出去。在接收端, $\tilde{e}'(n)$  由 D/A 变成采样信号  $\tilde{e}(n)$  并与同样的预测值  $\hat{x}(n)$  相加,恢复出语音信号  $\tilde{x}(n)$

$$\tilde{x}(n) = \hat{x}(n) + \tilde{e}(n) \quad (1.1.8)$$

由式 (1.1.7) 和 (1.1.8) 可得

$$x(n) - \tilde{x}(n) = e(n) - \tilde{e}(n) \quad (1.1.9)$$

即重建波形的误差等于预测误差的量化误差。若  $\hat{x}(n)$  是  $x(n)$  的很好预测,则预测误差  $e(n)$  将比  $x(n)$  小得多。因而,在保证同样传输精度(同样的量化间隔)的条件下,每次采样的量化比特数可以降低,也就是降低了要求的传输率。相应地,若保持相同的传输率,则传输精度可以提高。

读者可能会问:  $\hat{x}(n)$  如何产生呢? 实际上,  $\hat{x}(n)$  是根据输入信号  $x(n)$  的过去值,用所谓“线性预测滤波器”产生的。但是,由于接收端没有输入信号  $x(n)$  存在,所以为了避免编码、解码不一致,用于预测的不是输入信号  $x(n)$  的过去值,而是  $x(n)$  的量化值  $\tilde{x}(n)$  的过去值。这样我们就得到了图 1.4 (b) 的框图。

在 DPCM 系统中,线性预测滤波器的系数是固定的,其值是根据输入语音信号的长期统计特性,用最小均方误差准则求得的。但是,实际的语音信号是高度非平稳的。不同人的语音差别很大。即使同一人的语音,其统计特性也在不断地变化。因而,采用固定的预测系数和固定的 A/D 变换器,将使性能降低。这就促使我们采用自适应滤波技术。在图 1.4(b) 中示出了采用自适应技术的 DPCM 系统,即 ADPCM 系统。在 ADPCM 中,自适应算法随着输入统计特性的变化连续调整预测器和 A/D、D/A 变换器的参数。大量研究表明,在同样的通话质量下,采用 ADPCM 可比 PCM 要求的传输率低一半。

### 三、自适应天线阵

对于一个天线阵来说,各种各样的干扰(敌人的有意干扰、邻近设备的干扰、杂波及其它干扰)可能从主瓣进入,也可能从旁瓣进入。干扰的影响还由于天线制造和架设误差、多路径、扫瞄、干扰环境的变化而变得严重。天线的设计者首先要考虑使从旁瓣进入的干扰影响为最小。但是,在电子对抗环境里这是非常困难的(图 1.5)。因为在电子对抗环境

里工作的雷达等电子系统的干扰信号来自干扰机，其产生的干扰的强度一般比有用信号强  $70 \sim -80\text{dB}$ 。就目前技术水平来说，除非付出极大的代价，否则天线旁瓣电平很难优于  $-30 \sim 40\text{dB}$ 。即使信号从主瓣进入，而干扰从旁瓣进入，干扰仍比信号强  $30 \sim 50\text{dB}$  或更多(如图 1.5(a))。这使得检出信号相当困难。若干扰来自固定方向，则我们可以通过设计天线波束图，使其在干扰方向有很深的零点。但通常干扰方向是变化的。我们就希望这些零点方向能随干扰方向而变化。采用自适应技术就可实现这个目的，这就是自适应旁瓣对消技术(图 1.5(b))。

我们来看图 1.6 所示的二元阵。在它的每个阵元通道中，均设置了加权系数，即  $w_1$  和  $w_2$ 。改变  $w_1$  和  $w_2$ ，就可改变天线波束图的零点方向。我们通过下面的讨论来对此加

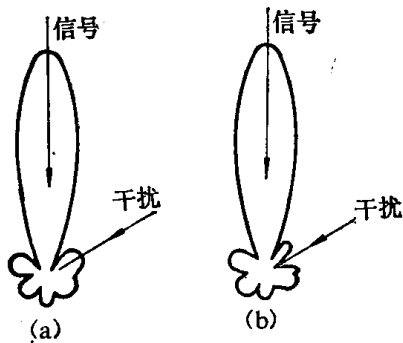


图 1.5 自适应旁瓣对消

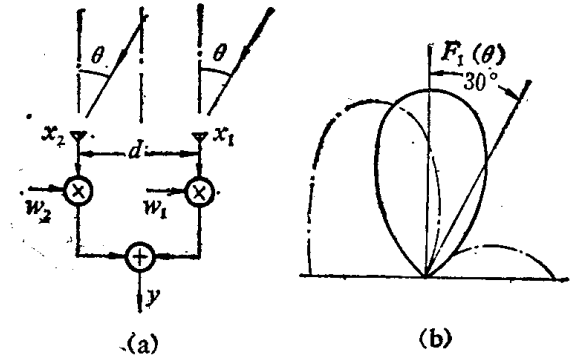


图 1.6 二元阵及其波束图

以说明。

设入射平面波方向偏离阵法线方向为  $\theta$ ，阵元间距  $d = \lambda/2$  ( $\lambda$  为波长)，则两阵元的输入信号为

$$x_1 = A(t)\exp(j\Phi/2) \quad (1.1.10a)$$

$$x_2 = A(t)\exp(-j\Phi/2) \quad (1.1.10b)$$

其中  $A(t)$  为输入信号的幅度因子(我们已忽略了幅度因子的延时)。而

$$\Phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta \quad (1.1.11)$$

当  $d = \lambda/2$  时， $\Phi = \pi \sin \theta$ 。所以，输出  $y$  可写成

$$y = A(t)[w_1 \exp(j\Phi/2) + w_2 \exp(-j\Phi/2)]$$

或 
$$y = A(t) \cdot F(\Phi) \quad (1.1.12)$$

其中 
$$F(\Phi) = w_1 \exp(j\Phi/2) + w_2 \exp(-j\Phi/2) \quad (1.1.13)$$

将 (1.1.11) 代入 (1.1.13) 得

$$F(\Phi) = F_1(\theta) = F\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta\right) \quad (1.1.14)$$

$F_1(\theta)$  或  $F(\Phi)$  通常称为波束图。

对普通的二元阵，其  $w_1 = w_2 = 1$ 。当其  $d = \frac{\lambda}{2}$  时不难根据 (1.1.13~14) 得到

$$F(\Phi) = \exp(j\Phi/2) + \exp(-j\Phi/2) = 2 \cos(\Phi/2) \quad (1.1.15)$$

$$F_1(\theta) = F(\pi \sin \theta) = 2 \cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \theta\right) \quad (1.1.16)$$

这种情况的波束图由图 1.6 (b) 的实线表示。

现在，我们在给定限制条件

$$w_1 + w_2 = 1 \quad (1.1.17)$$

的情况下，使波束图  $F_1(\theta)$  在  $\theta_1$  或  $\Phi_1 = \pi \sin \theta_1$  方向产生一个零点：

$$w_1 \exp(j\Phi_1/2) + w_2 \exp(-j\Phi_1/2) = 0 \quad (1.1.18)$$

联立解方程(式 1.1.17 和式 1.1.18) 得到

$$w_1 = \frac{1}{1 - \exp(j\Phi_1)} \quad (1.1.19a)$$

$$w_2 = \frac{1}{1 - \exp(-j\Phi_1)} \quad (1.1.19b)$$

若要求在  $\theta_1 = 30^\circ$  处产生一个零点，则不难得到

$$w_1 = (1 + i)/2, \quad w_2 = (1 - i)/2$$

此时的波束图为

$$F(\Phi) = 2 \cos(\Phi/2 + \pi/4) \quad (1.1.20)$$

在图 1.6 (b) 中，用点划线示出了这个波束图。它在  $30^\circ$  方向产生了一个零点。若干扰来自  $30^\circ$  方向，则将完全被抑制。当干扰方向改变时，根据自适应算法算出的结果，连续调整  $w_1$  和  $w_2$ ，可以实现对干扰的跟踪抑制。

## § 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示于图 1.7。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。

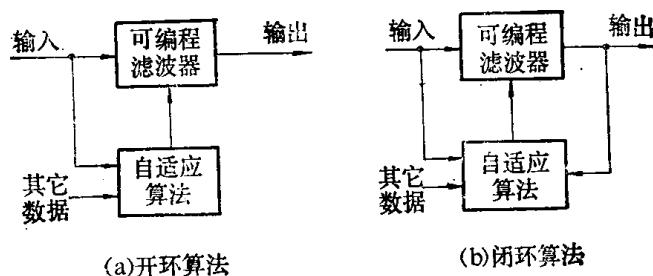


图 1.7 自适应滤波器

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它数据有关。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(图 1.7 (a)) 的控制输出仅取决于滤波器的输入和某些其它输入数据，但不取决于滤波器的输出。闭环算法(图 1.7 (b)) 的控制输出则是滤波器输入、滤波器输出以及某些其它输入的函数。

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，如雷达系统中，开环算法亦受到很大的重视。

### 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。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。

FIR 横式滤波器的框图示于图 1.8。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:

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

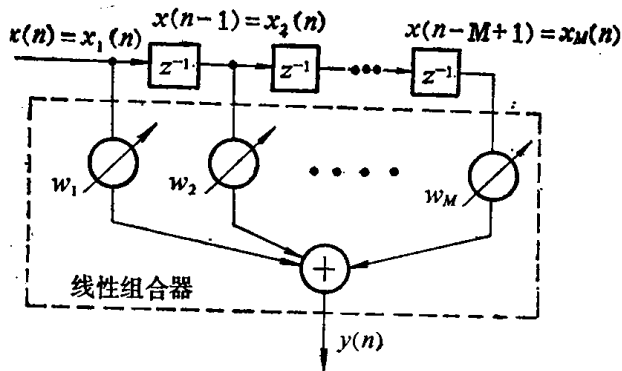


图 1.8 FIR 横式滤波器

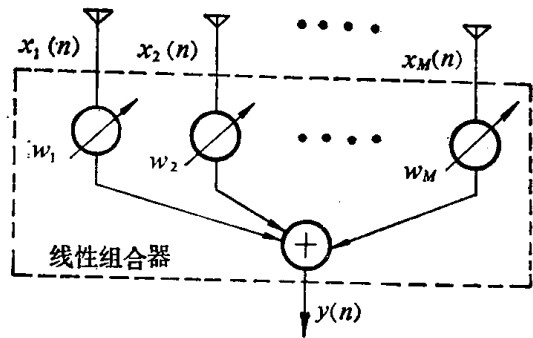


图 1.9 天线阵

因而，图 1.8 中用虚线框住的部分又常被称为线性组合器。这是一种全零点滤波器。它始终是稳定的，且能实现线性的相移特性。因此它在自适应滤波中得到了最广泛的应用。它的缺点是：为了实现具有陡峭边沿的通带特性需要相当高的阶数。

典型的阵列示于图 1.9，其重要组成亦是一个线性组合器。因而，时域处理的结果常可推广到空域处理的情况。但是，必须特别注意的是：对于阵列来说，我们必须进行时域-空域联合处理，这比单纯的时域处理复杂，并且具有一些特殊的性质。

IIR 横式滤波器的框图示于图 1.10。这种滤波器既有零点又有极点，或者只有极点。它可以用不高的阶数实现具有陡峭边沿的带通特性。其主要缺点是稳定性不好和相位特性难于控制。这些缺点限制了它在自适应滤波中的应用。但是由于它较易实现具有陡峭

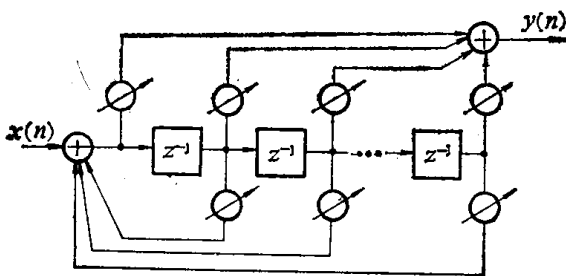


图 1.10 IIR 横式滤波器

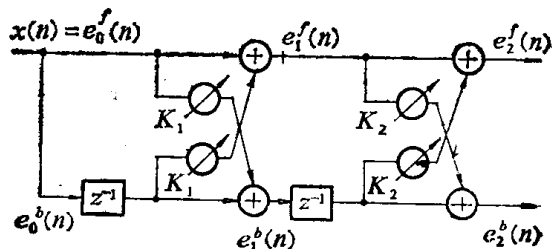


图 1.11 全零点格形滤波器

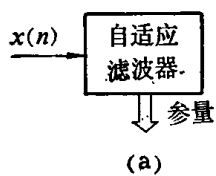
边沿的带通特性,在实现对多径效应的自适应均衡等方面有很大潜力,因而引起人们的极大兴趣。

格形滤波器亦可分为全零点式、全极点式及零极点式。图 1.11 是全零点格形滤波器的框图。其主要优点是具有相对独立的组件结构,每一组件的参数可独立调节;对舍入误差不敏感;各阶反向预测误差(见第三章)相互正交。由于这些特点,格形滤波器在自适应滤波器中得到了愈来愈广泛的应用。

### 1.2.3 自适应滤波的类型

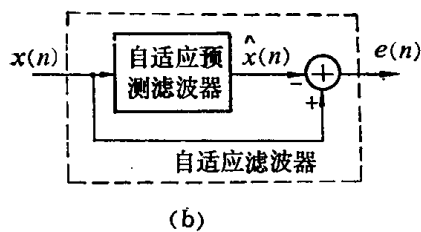
从应用的角度来分,可将自适应滤波分成三类(图 1.12):

一、自适应参数估计,如图 1.12 (a) 所示。此时,自适应滤波器的作用在于对输入  $x(n)$  的统计特性进行估计。



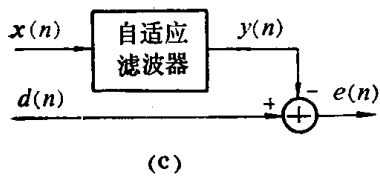
二、自适应预测,如图 1.12 (b) 所示。自适应预测滤波器根据输入  $x(n)$  的过去值  $x(n-1), \dots, x(n-M)$ , 对输入  $x(n)$  进行预测。广泛采用线性预测滤波器。其输出的  $x(n)$  的预测值  $\hat{x}(n)$  为

$$\hat{x}(n) = - \sum_{i=1}^M a_{Mi} x(n-i) \quad (1.2.2)$$



预测误差  $e(n)$  为

$$e(n) = x(n) - \hat{x}(n) = x(n) + \sum_{i=1}^M a_{Mi} x(n-i) \quad (1.2.3)$$



这种情况的输出信号可以是  $\hat{x}(n)$  或  $e(n)$ 。

三、联合过程估计,如图 1.12 (c) 所示。自适应滤波器的输入  $x(n)$  与需要信号  $d(n)$  相关。自适应滤波器的作用在于使其输出  $y(n)$  为  $d(n)$  的一个最佳估计。

图 1.12 自适应滤波分类

## § 1.3 自适应滤波技术的发展简史

自适应技术与优化理论有密切的关系。关于优化理论的研究可以追溯到牛顿和莱布尼兹的时代。牛顿和莱布尼兹的微分学是求函数极值的基础。伯努利、欧拉、拉格朗日和维尔斯特拉斯建立了求极值函数的变分法。拉格朗日采用引入未知常数的方法解决了带约束条件的极值问题。柯西首次采用最陡下降法解决无约束条件的极小值问题。高斯的最小二乘法是一类极为重要的优化和自适应算法的基础。

进入本世纪以来,在通信领域, Nyquist<sup>[2]</sup> 及 Hartley<sup>[3]</sup> 在二十年代研究了频带及信噪比问题。 香农<sup>[4]</sup>和维纳<sup>[5]</sup>在四十年代完成了对通信与电子系统优化的奠基性研究工作。 香农第一次提出了信息的量度方法。 维纳建立了最佳滤波器的基础。他们的工作对雷达、通信及其它许多领域产生了深刻的影响。1960年,卡尔曼<sup>[6]</sup>在维纳工作的基础上,导出了特别适于动态系统估计问题的递推算法。这就是有名的卡尔曼滤波算法。他的工作是最佳滤波器研究的又一重大进展。



对最优电子系统的研究及实际的需要,推动了对自适应信号处理系统的研究。五十年代末,“自适应天线”(adaptive antenna)这一术语首先由 Van Atta<sup>[6]</sup>等人用来描述所谓“自定相天线系统”(self-phasing antenna system)。而“自适应滤波器”(adaptive filter)则最先由 Jakowatz 等人<sup>[7]</sup>于六十年代初用来描述一个从噪音中提取出现时刻随机的信号的系统。

自六十年代初开始,在许多领域出现了对自适应滤波技术的开创性研究工作。在这些工作的基础上,再加之大规模集成电路技术、计算机技术的飞速发展,自适应滤波技术在近二十多年来获得了极大的发展和广泛的应用,成为最活跃的研究领域之一。

我们首先来看看几个重要领域中自适应滤波技术的发展概况。

**自适应均衡** 传输线路特性不理想会引起传输失真(如交调)。对这种不理想特性进行校正的电路称为均衡器。六十年代之前,均衡器的参数是固定的或手调的,其性能很差。Lucky 对自适应均衡器的研究作了很大的贡献。1965年,他根据极小极大准则提出了一种“迫零自适应均衡器”<sup>[8]</sup>。第二年,他又将此算法推广到跟踪方式<sup>[9]</sup>。Lucky 的工作推动了对自适应均衡器的研究。1967年, Austin 提出了判决-反馈均衡器。1969年, Gersho 等人提出了根据最小均方误差准则的自适应均衡算法。1970年, Brady 提出分数间隔自适应均衡器方案。1972年 Ungerboeck 对采用 LMS 算法的均衡器的收敛性进行了详细的分析。1974年, Godard 提出了采用卡尔曼滤波的横式自适应均衡器。1979年, Satorius 等人提出了格形自适应均衡器。这些人都对自适应均衡器的发展做出了贡献。

**自适应波束形成** Howells<sup>[10]</sup>在五十年代关于中频自适应旁瓣对消器的研究是自适应滤波的开创性工作之一。这种对消器能够自动将波束零点对准干扰方向。1966年, Applebaum<sup>[11]</sup>根据最大输出信噪比准则,导出了自适应阵列算法,并把旁瓣对消作为该算法的特殊情况。1967年, Widrow 等人<sup>[12]</sup>以 LMS 算法为基础对自适应天线的研究工作是自适应滤波技术发展的重要里程碑。文献[12]成了自适应滤波技术的经典文章。高分辨力算法与自适应波束形成密切相关<sup>①</sup>。1967年 Burg<sup>[13]</sup>提出的最大熵法,及同年 Capon<sup>[14]</sup>提出的最大似然法,对高分辨力自适应阵列的研究有巨大的推动作用。近十多年来,人们对于包括干扰对消和高分辨力算法的自适应波束形成的研究取得了极大的进展。

**语音处理** 1967年, Atal 等人<sup>[15]</sup>指出由于语音的非平稳性,必须在语音波形编码中采用自适应处理。他们提出了采用自适应线性预测器的语音波形编码方法。在声码器研究方面,最早是 Saito 等人<sup>[16]</sup>于1966年进行的将最大似然法用于语音预测的研究。七十年代初, Atal<sup>[17]</sup>采用自适应线性预测滤波器进行语音分析。随后, Itakuta 等人发展了 Atal 的工作,采用了格形线性预测滤波器。最初,格形滤波器的计算基于 Burg 于1967年提出的算法。1981年, Makhoul 等人提出了格形滤波器的自适应算法。

**自适应噪音对消** 最早从事关于长途电话系统自适应回声对消器的研究工作是 Kelly<sup>[18]</sup>和 Sondhi<sup>[19]</sup>等人。在同一时期, Widrow 等人进行了关于自适应对消心电图记录器的市电干扰的研究工作。他们的结果于1975年发表在他们关于自适应噪音对消

<sup>①</sup> 高分辨力算法属于近代谱分析技术,本书将不详叙。